Termodinámica y energía

Energías renovables

Laura Jarauta Rovira
Marta Morata Cariñena

PID_00166264



Índice

Introducción 7

Objetivos 10

1. Energía, calor y temperatura 13
1.1. Energía 13
1.2. Calor 14
1.3. Temperatura 16
1.4. Medida del calor 18
1.4.1. Calor específico 19
1.4.2. Calor latente 21
1.4.3. Transmisión del calor 24
1.5. Diferencia entre calor y temperatura 30
1.6. ¿Qué hemos aprendido? 30

2. Leyes de la termodinámica 32
2.1. Conceptos básicos de termodinámica 33
2.1.1. Energía interna y entropía 34
2.1.2. Sistemas termodinámicos 34
2.1.3. Clasificación de los sistemas termodinámicos 36
2.1.4. Concepto de presión y de volumen 37
2.2. Estado de un sistema termodinámico 38
2.3. Tipos de procesos termodinámicos y diagramas *T-S* 39
2.3.1. Diagramas *T-S* 40
2.3.2. Proceso isotermo 41
2.3.3. Proceso isócoro 41
2.3.4. Proceso isóbaro 42
2.3.5. Proceso adiabático 42
2.4. Ley cero de la termodinámica 42
2.5. Primer principio de la termodinámica 45
2.6. Segundo principio de la termodinámica. Entropía 46
2.7. ¿Qué hemos aprendido? 48

3. Acceso a la energía 49
3.1. Datos de la energía 49
3.1.1. Evolución y estado actual del consumo energético 50
3.1.2. Tipos de energía y concepto de energía primaria 53
3.1.3. Consumo de energía primaria en España 54
3.1.4. Consumo de energía en el hogar 56
3.1.5. La energía eléctrica 58
3.2. Los agentes del mercado eléctrico 68
3.2.1. Productores: el *mix* de generación 69

3.2.2. Transformación y distribución 72
3.2.3. Comercializadores 73
3.2.4. Consumidores 73
3.2.5. El operador del mercado ibérico de energía 74
3.3. ¿Qué hemos aprendido? 77

4. Energía térmica y energía nuclear 78
4.1. Las transformaciones de energía 79
4.2. Central térmica 81
4.2.1. Combustibles 82
4.2.2. Ciclo termodinámico 83
4.2.3. Central térmica convencional 85
4.2.4. Central térmica de ciclo combinado: turbina de gas con turbina de vapor 87
4.3. Central nuclear 89
4.3.1. Combustible: del uranio a los elementos combustibles 89
4.3.2. Ciclo termodinámico 91
4.3.3. Impacto ambiental asociado 91
4.4. ¿Qué hemos aprendido? 93

5. Energías eólica y fotovoltaica 94
5.1. ¿Qué es una fuente de energía renovable? 94
5.2. Estudio de los recursos renovables 95
5.2.1. Viento 95
5.2.2. Radiación solar 99
5.2.3. El problema de la regulación de las energías renovables 100
5.3. Energía eólica 101
5.3.1. Criterios para la implantación de la energía eólica 102
5.3.2. Aerogeneradores 103
5.3.3. Elementos auxiliares 108
5.3.4. Impacto ambiental 109
5.4. Energía fotovoltaica 112
5.4.1. Introducción: tipos de plantas solares 112
5.4.2. Tipos de plantas solares fotovoltaicas 115
5.4.3. Conexión a la red: marco legal 118
5.5. ¿Qué hemos aprendido? 118

6. Sistema fotovoltaico autónomo 120
6.1. Elementos que componen una instalación fotovoltaica 121
6.1.1. Sistema de captación 122
6.1.2. Acumulación: baterías 128
6.1.3. Regulación 130
6.1.4. Inversor continuo-alterno 131
6.2. Dimensionamiento de la instalación 134
6.2.1. Demanda energética 134

6.2.2. Cálculo de la energía necesaria 138
6.2.3. Radiación solar disponible 138
6.2.4. Número de módulos fotovoltaicos necesarios 141
6.2.5. Capacidad del sistema de acumulación: número de baterías 143
6.2.6. Selección de los demás elementos de la instalación 145
6.3. Sistemas híbridos fotovoltaico-eólicos 147
6.4. ¿Qué hemos aprendido? 148

7. Sistemas generadores aislados 149
7.1. Sistemas generadores aislados 149
7.2. ¿Qué hemos aprendido? 150

8. Problemas resueltos 151
8.1. Enunciados 151
8.2. Soluciones 153

Resumen 160

Ejercicios de autoevaluación 163

Solucionario 165

Glosario 165

Bibliografía 169

Introducción

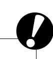
La sociedad actual se caracteriza por hacer un uso continuado de la energía, en sus diferentes formas, para satisfacer sus necesidades. Desde que nos levantamos, sea con la ducha de agua caliente, el microondas para calentar el café o con la radio, y posteriormente a lo largo de toda la jornada, estamos tan acostumbrados a consumir energía que ni siquiera nos damos cuenta de cuándo lo hacemos.

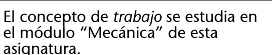
El uso y la aplicación de la energía ha mejorado la habitabilidad en las ciudades y ha aumentado el nivel de confort con la calefacción o la iluminación. La energía también ha posibilitado diferentes transformaciones fisicoquímicas que han originado unos efectos no deseados y desconocidos que están afectando seriamente a la sostenibilidad de la manera de usar la energía.

El concepto de *energía* se estudia en el módulo "Mecánica" de esta asignatura.

El modo como utilizamos la energía afecta a las posibilidades de mantener el desarrollo de nuestra sociedad. Si no consumimos mucha, tendremos que invertir demasiados esfuerzos para cubrir las necesidades básicas y no podremos dedicar esfuerzos a desarrollarnos. Pero si consumimos demasiada energía, el coste monetario, ambiental o de recursos de este exceso de consumo obligará a dedicar un esfuerzo adicional que no podemos orientar hacia el desarrollo que perseguimos. Las formas de energía que se han utilizado para actividades básicas han ido evolucionando con el tiempo. Desde la leña, el carbón, el petróleo, el gas o la electricidad, hasta la energía solar o fotovoltaica. Se puede observar cómo históricamente no hay ningún determinismo tecnológico respecto a las fuentes de energía y las técnicas que se pueden utilizar. Las situaciones actuales son producto de las decisiones tomadas a lo largo de la historia en cuanto al tipo y la calidad de las prestaciones, los costes económicos, la salubridad, la contaminación y la asignación de los recursos energéticos.

La energía se puede definir como la capacidad de producir un trabajo. Como hay diferentes formas de trabajo, se invertirá en diferentes manifestaciones de energía. Por ejemplo, está el trabajo eléctrico y la energía eléctrica, o el trabajo mecánico y la energía mecánica. Y dentro de la física hay una rama, la termodinámica, que se ocupa precisamente del estudio de la energía y sus transformaciones en los diferentes sistemas desde un punto de vista macroscópico.





El concepto de *trabajo* se estudia en el módulo "Mecánica" de esta asignatura.



Nivel macroscópico

El nivel macroscópico, desde el punto de vista de la física, es el nivel de descripción de un estado físico concreto de partículas que integran un cuerpo y se puede definir a partir de magnitudes extensivas, como el volumen, la longitud o la masa, y magnitudes intensivas medianas, como la presión o la temperatura.

La termodinámica es una ciencia fenomenológica de carácter universal que establece unos criterios básicos sobre la interacción y la evolución de la energía y la materia de muchos sistemas, unos criterios que son válidos en problemas comunes de ingeniería, química y física. ¿Y por qué decimos que la termodinámica es fenomenológica? Porque está basada en leyes o principios que se

han formulado a partir de la experiencia. Eso ha sido posible, en parte, porque su estudio se puede abordar desde el punto de vista macroscópico, a partir de las propiedades del sistema: presión (*P*), volumen (*V*) y temperatura (*T*) relacionadas por leyes empíricas.

En cualquier caso, en este módulo estudiaremos la termodinámica sólo en un nivel descriptivo y conceptual para entender los procesos que están implicados en la generación de la energía.

Hay que destacar que, de los diferentes tipos de energía que podemos tener (cinética, térmica, potencial, etc.), la que más interviene en nuestro día a día, como sociedad industrializada y tecnológica, es la energía eléctrica. Hemos llegado a un punto en el que no nos sorprende la facilidad con la que encendemos una bombilla o enchufamos un aparato. Sin embargo, el sistema eléctrico tiene un funcionamiento muy complejo. Por ejemplo, un aspecto que muchas veces se desconoce del sistema eléctrico es que éste está coordinado hasta tal punto que la electricidad que consumimos en cada momento se genera en ese preciso instante en la central eléctrica. Así pues, no hay electricidad acumulada por si acaso nos ponemos a utilizar un aparato, sino que en cada instante el consumo de electricidad es el mismo que la producción.

Además, el sistema eléctrico y energético actual, de nuestra sociedad, es completamente dependiente de los combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural). Estos recursos se encuentran en cantidades finitas en la Tierra, por lo que se van agotando y, además, provocan impactos ambientales como el cambio climático. Otros tipos de fuentes energéticas, como la energía nuclear, presentan aspectos que no están del todo resueltos, como la gestión de los residuos nucleares que se generan.

En este contexto las energías renovables están comenzando a tener cada vez más importancia. Se trata de fuentes energéticas inagotables que tenemos disponibles y que nos permiten generar electricidad con recursos locales y sin hipotecar, con nuestro consumo, la disponibilidad de los recursos de las generaciones futuras. La energía eólica y la fotovoltaica son dos ejemplos de ello. Pero hay que tener en cuenta que estos sistemas pueden tener otros tipos de impactos ambientales o sociales que habrá que considerar desde un buen principio a la hora de construir estos tipos de instalaciones.

Conocer el funcionamiento del sistema eléctrico y sus características nos servirá sin duda para entender mejor los retos y las oportunidades que tenemos como sociedad. Más todavía si tenemos en cuenta que nuestra generación será seguramente una de las últimas que podrá disponer de la energía fósil (gas, petróleo y carbón) a bajo coste y con una producción casi ilimitada.

Como conclusión, cabe indicar que en este módulo trataremos, precisamente, de la termodinámica en particular y de la energía en general. El módulo está estructurado en dos grandes partes:

1) La primera parte corresponde a los dos apartados primeros. En éstos estudiaremos la termodinámica como una rama de la ciencia. Comenzaremos definiendo los conceptos básicos de esta disciplina y, a continuación, enunciaremos las leyes básicas.

2) La segunda parte corresponde a los apartados del 3 al 7. En ellos analizaremos el funcionamiento del sistema energético actual, centrándonos en las diferentes tecnologías de generación eléctrica: las de fuentes convencionales o fósiles y las de energías renovables. Comenzaremos haciendo un repaso al modelo energético actual y seguidamente, en el apartado 4, analizaremos las energías térmica y nuclear, que son las fuentes más importantes de energía en nuestro país. A continuación, en los apartados 5 y 6 nos centraremos en dos de las energías renovables más importantes: la eólica y la solar. Finalmente, en el apartado 7 hablaremos de los sistemas productores de energía autónomos.

Objetivos

En este módulo se persiguen los objetivos siguientes:

1. Saber qué son, desde el punto de vista de la física: la energía, el calor, la temperatura, la presión, el volumen y la entropía.

2. Conocer las tres leyes de la termodinámica.

3. Conocer cómo es el consumo energético mundial actual y cuál ha sido su evolución.

4. Detallar de qué fuentes energéticas se obtienen los recursos.

5. Definir términos clave para la valoración de la energía: energía libre, energía primaria, energía secundaria, energía final y energía útil.

6. Analizar el consumo energético en España, que, al tratarse de una isla energética, da una visión global de cómo es un sistema energético.

7. Describir los principales impactos ambientales y sociales asociados al consumo de energía.

8. Detallar los agentes que intervienen en el mercado eléctrico: productores, distribuidores, comercializadores, consumidores y el operador del mercado.

9. Describir cómo funcionan, desde el punto de vista termodinámico y tecnológico, las principales centrales de generación eléctrica actuales: centrales térmicas, centrales de ciclo combinado y centrales nucleares.

10. Dar a conocer qué son las fuentes de energía renovable y cuáles son sus peculiaridades en comparación con las fuentes de energía fósil.

11. Aprender a evaluar los recursos renovables, concretamente, los recursos eólicos y la radiación solar.

12. Detallar los elementos que forman un parque eólico.

13. Describir cómo funciona un aerogenerador y evaluar su potencial de generación de energía.

14. Enumerar los diferentes tipos de plantas solares existentes: térmicas, termoeléctricas y fotovoltaicas.

15. Describir cómo funciona una célula fotovoltaica y los diferentes tipos que existen.

16. Detallar los elementos que forman una planta fotovoltaica.

17. Aprender a dimensionar una instalación solar fotovoltaica autónoma para que pueda satisfacer una demanda eléctrica concreta.

18. Describir los sistemas de generación aislados: cómo son y en qué casos son necesarios.

1. Energía, calor y temperatura

Comenzaremos el estudio de la termodinámica a partir de dos conceptos tan comunes como la *temperatura* y el *calor*. ¿Por qué hablamos de calor y de temperatura?

El calor es una forma de energía y la temperatura es una medida de energía, y la energía es, precisamente, uno de los conceptos clave de este módulo, como habéis visto en la introducción. Así, hablaremos de calor y de temperatura, pero antes definiremos el concepto de *energía*, aunque seguro que todos habéis oído hablar de ella (sólo es necesario que miréis las noticias o el módulo de mecánica).

En este apartado definiremos estos tres conceptos (*energía*, *calor* y *temperatura*), pero además veréis cómo medir el calor y un conjunto de magnitudes que están relacionadas con él.

¿Qué aprenderemos?

En este apartado veréis qué son conceptos tan cotidianos como el calor, la energía y la temperatura, cómo se miden y en qué se diferencian. También veréis una cosa fundamental para la termodinámica: la transmisión de calor.

¿Qué supondremos?

Para el estudio de este apartado supondremos que tenéis asimilados los conceptos de *trabajo* y *energía* del módulo de mecánica.

1.1. Energía

Cuando observamos a nuestro alrededor, el mundo y, en concreto, nuestra vida diaria, podemos afirmar que tanto uno como la otra están basados en la energía. La energía eléctrica, por ejemplo, nos rodea en casi todo lo que hacemos o usamos. La energía eléctrica se convierte en diferentes tipos de energía que utilizamos a diario, como la energía lumínica para nuestra iluminación, la energía mecánica para nuestros electrodomésticos o la energía térmica para calentarnos. Pero veamos qué dice la física del concepto de *energía*.

> La **energía** es la capacidad que tiene un cuerpo de realizar trabajo o de transformar o calentar.

El trabajo es una de las vías de transmisión de energía entre los cuerpos. Cuando se habla de trabajo en un vocabulario común, asociamos este concepto al esfuer-

zo. Desde el punto de vista de la física, el concepto de *trabajo* no es más que la fuerza resultante aplicada sobre un objeto (entendida como la fuerza total efectiva) y, además, este objeto debe realizar un determinado desplazamiento. Por ejemplo, cuando se dispone de un objeto que se está desplazando a una velocidad y este objeto choca con una pared donde está apoyado un clavo, cuando se produce el choque, el objeto invierte el trabajo que ha realizado en el desplazamiento con la energía necesaria para poder clavar el clavo en la pared.

Por otro lado, la energía forma parte de un grupo de magnitudes que se denominan **magnitudes extensivas**. Estas magnitudes se caracterizan por ser aditivas. Si consideramos un sistema formado por dos partes, el valor total de una magnitud extensiva es la suma de los valores en cada una de las dos partes. Por ejemplo, la masa o el volumen de un cuerpo, o la energía de un sistema termodinámico son magnitudes extensivas.

Recordad

Recordad lo que habéis visto en el módulo de mecánica, que el trabajo se expresa matemáticamente como el producto escalar de la fuerza por el desplazamiento:

$$W = \int F\,dx$$

Así, desde una visión de la termodinámica, la energía se entiende como una propiedad extensiva que se puede presentar de múltiples formas: mecánica, térmica, eléctrica, química, nuclear, etc. La unidad de energía es exactamente la misma que la del trabajo físico. En el Sistema Internacional se mide en julios (1 J = 1 N · m).

Recordad

N es el símbolo del newton, la unidad de fuerza, y m es el símbolo del metro, la unidad de longitud en el Sistema Internacional de unidades.

La energía, como hemos dicho, es una magnitud extensiva porque si unimos dos cuerpos con una determinada energía, la energía total será la suma de ambas. Eso se debe también a que es una magnitud que depende de la cantidad de sustancia que tiene el cuerpo o sistema.

Por otro lado, concebimos la energía como una magnitud física porque se puede medir y atribuirle un valor numérico cuantitativo. Es decir, este electrodoméstico consume tanta energía.

Se puede decir que la termodinámica se ocupa de las transformaciones y que la ingeniería se encarga de procesar y gestionar bien esa energía y sus transformaciones para darle a la sociedad los productos y servicios que necesita.

1.2. Calor

Si pensamos en cómo está configurado el Universo, diremos que el Universo es materia y es energía. La materia está compuesta de átomos y moléculas (entendiendo las moléculas como un conjunto de átomos) y la energía hará que estos átomos y moléculas estén siempre en movimiento. El movimiento que realicen estos átomos y moléculas puede ser de rotación alrededor de sí mismas, de vibración o choques de unas contra otras. El resultado del movimiento de estos átomos o moléculas es una forma de energía que se llama **calor**, que se encuentra en todo tipo de materia.

Materia

Toda la materia se compone de átomos y moléculas.

Pero ¿éste es el mismo calor del que hablamos habitualmente y que sentimos nosotros?

En el organismo, la estimulación del sistema nervioso puede ocasionar un aumento del metabolismo celular, lo que aumenta el calor producido.

El calor se puede definir en términos triviales como el contenido "energético" de un sistema. Por tanto, suma todas las energías que provienen de los movimientos de los átomos que lo componen. Este calor sólo se pone de manifiesto cuando se transfiere del sistema a los alrededores o viceversa. El calor no es una nueva forma de energía, sino una transferencia de energía en la que intervienen un gran número de partículas.

La energía se puede presentar de formas muy diferentes y se puede transformar de un tipo de energía a otro. De hecho, "la energía no se crea ni se destruye, sólo se transforma". Veremos más adelante, en el apartado 2.5, que esta ley es fundamental y tiene el rango de principio. Por tanto, muchos tipos de energía se pueden transformar en calor. La energía electromagnética, la electroestática o eléctrica, la mecánica, la química o la nuclear, pueden calentar una sustancia y hacer que se incremente la velocidad de sus moléculas. Si ponemos energía en un sistema, éste se calienta; si quitamos energía, se enfría. Es lo que sucede, por ejemplo, cuando tenemos frío y saltamos para entrar en calor; o si tenemos frío en las manos y nos frotamos una contra otra para calentarlas.

Por ejemplo, la energía mecánica se transforma en energía térmica siempre que hacemos botar una pelota. Cada vez que la pelota rebota sobre el suelo, parte de la energía que lleva la pelota (energía cinética debida a la velocidad) se convierte en calor, y hace que la pelota rebote y cada vez alcance una menor altura. Es decir, hay una pérdida de energía debido a la transferencia de energía en forma de calor que se produce en cada rebote.

Otro ejemplo es el caso de la energía térmica que se transfiere de unos objetos a otros y provoca que se calienten. Cuando calentamos agua en una cazuela, el calor del fuego genera que las moléculas de la cazuela empiecen a vibrar más deprisa. La consecuencia de esta vibración es que la cazuela se calienta. A su vez, el calor que adquiere la cazuela provoca que las moléculas de agua se muevan más deprisa y se calienten. Por tanto, cuando calentamos algo, lo que estamos haciendo es incrementar la velocidad de sus moléculas.

Vemos, por tanto, que existen muchas formas de energía y que esta energía se puede transformar en otra forma de energía o calor.

La energía eléctrica se transforma en energía térmica cuando usamos estufas eléctricas, calentadores o bombillas. También nuestros cuerpos convierten la energía química de los alimentos que comemos en calor. La luz del sol se transforma en calor y provoca que la superficie terrestre se caliente.

Actividad 1.1.

¿Se os ocurren más ejemplos de transformación de un tipo de energía en calor en nuestra vida cotidiana?

En resumen, el calor es la energía que tiene un objeto debida al movimiento de sus átomos o moléculas. Estos átomos o moléculas están en movimiento continuo, vibran o chocan. Al aumentar la energía de un objeto, sus átomos y moléculas se mueven más deprisa, lo que incrementa su energía de movimiento o calor.

Pero si la energía se transforma en calor, ¿por qué en las noticias dan siempre la temperatura? ¿Y por qué cuando nos dan la temperatura ya nos hacemos una idea de si hará mucho calor o no? ¿Qué es la temperatura?

1.3. Temperatura

En nuestra vida diaria experimentamos la temperatura todos los días: cuando hace calor, sentimos calor; cuando está nevando, sentimos frío; cuando estamos hirviendo agua, hacemos que la temperatura aumente y cuando hacemos helado, esperamos que la temperatura baje.

Como hemos introducido al principio del apartado, la materia está formada por átomos y moléculas.

El concepto de *temperatura* se puede introducir como la medida del calor o de la energía térmica de las partículas de una sustancia.

Pero los átomos y las moléculas de una determinada sustancia no siempre se mueven a la misma velocidad. Eso significa que hay un rango de energía de movimiento dentro de las moléculas. Por ejemplo, en un gas, las moléculas se mueven aleatoriamente y a diferentes velocidades (unas se mueven más rápido y otras se mueven más lentamente).

Como lo que medimos es su movimiento medio, la temperatura no depende del número de partículas en un objeto y, por tanto, no depende de su medida. Por ejemplo, la temperatura de un cazo de agua hirviendo es la misma que la temperatura de una olla de agua hirviendo, a pesar de que la olla sea mucho más grande y tenga más cantidad de moléculas de agua que el cazo.

La **temperatura** es lo que se conoce como una magnitud intensiva

Una magnitud es intensiva cuando, para un sistema en equilibrio dividido en partes, la temperatura global no es la suma de las temperaturas de cada una de las partes que confinan el sistema.

Es lo contrario a lo que sucede por ejemplo con la energía (podéis ver el subapartado 1.1), la masa, la cantidad de movimiento y muchas otras magnitudes que se denominan *magnitudes extensivas*. La idea que se intenta transmitir de la temperatura es que se trata de una medida del promedio de la energía térmica de un cuerpo.

Así, diremos que un cuerpo está caliente si tiene una temperatura elevada. Eso quiere decir que sus partículas, globalmente, tienen una velocidad elevada. Por otro lado, este cuerpo tendrá mucha energía térmica si, además de tener una elevada temperatura, tiene una gran cantidad de materia.

Las unidades de medida de la temperatura son las siguientes:

1) **Kelvin (K)**. Es la unidad fundamental para la medida de la temperatura absoluta y se simboliza con K.

Grados y kelvin

Hay que tener cuidado con la unidad de medida de la temperatura. Su nombre es *kelvin*, no *grado Kelvin*, y su símbolo es K, no °K.

Siempre se intentará utilizar el kelvin como una unidad de medida. Es la medida absoluta de la temperatura y es la que acepta el Sistema Internacional de unidades.

Se denomina *temperatura absoluta* porque su cero coincide con la temperatura más baja posible, es decir, el cero absoluto, que es aquella temperatura a la cual todas las partículas de un material se encontrarían en reposo. Fijaos en que el cero de temperatura en la escala Kelvin son –273,15 °C (mirad la ecuación 1).

2) **Grado Celsius (°C).** Con frecuencia, la medida de la temperatura se da en una escala más familiar, como es el **grado Celsius (°C).** Matemáticamente, el cambio de °C a K se expresa:

$$T\ (\mathrm{K}) = T\ (^\circ\mathrm{C}) + 273{,}15 \qquad (1)$$

Celsius y kelvin

Es importante notar que la unidad de temperatura en el Sistema Internacional es el kelvin.

Por ejemplo, supongamos una sustancia que se calienta y logra una temperatura de 37 °C. ¿Cuánto marcará un termómetro en kelvin (K)?

Hemos visto cómo la medida de la temperatura se puede expresar en diferentes unidades, hemos hablado de la medida de la temperatura en grados centígrados (°C) y kelvin (K) y hemos establecido la relación entre ambas unidades a partir de la ecuación (1):

$$T\ (\mathrm{K}) = T\ (^\circ\mathrm{C}) + 273{,}15 \qquad (2)$$

Teniendo en cuenta que la sustancia está a 37 °C, y aplicando la fórmula anterior, obtendremos el valor de la temperatura de la sustancia expresado en kelvin (K).

$$T\ (\mathrm{K}) = T\ (^\circ\mathrm{C}) + 273{,}15 = 37 + 273{,}15 = 310{,}15\ \mathrm{K} \qquad (3)$$

Por tanto, la temperatura de 37 °C se corresponde con 310 K, que es la misma temperatura expresada en unidades diferentes.

El aparato típico con el que se mide la temperatura se llama **termómetro**: observad que un termómetro en kelvin y en grados Celsius tiene la misma separación entre grados. Eso significa que un aumento de temperatura de un kelvin representa un aumento de la temperatura de un grado Celsius. Lo único que varía en un caso y en otro es dónde se sitúa el cero de la temperatura.

Al consultar la bibliografía americana o inglesa, podéis encontrar otras escalas de medida de la temperatura, como la escala **Fahrenheit (°F)** o la temperatura **Rankine (°R)**. Matemáticamente, la relación entre las diferentes escalas se expresa según las fórmulas siguientes:

$$T\ (^{\circ}\mathrm{C}) = \frac{T\ (^{\circ}\mathrm{F}) - 32}{1{,}8} \tag{4}$$

$$T\ (^{\circ}\mathrm{F}) = T\ (^{\circ}\mathrm{R}) - 459{,}67 \tag{5}$$

En estos casos, un termómetro en grados Celsius y uno en grados Fahrenheit, por ejemplo, tendrán una separación de grados diferente.

Ahora ya sabemos qué es la temperatura y a qué corresponde, pero queda ver qué es exactamente el calor y cómo se mide.

1.4. Medida del calor

El **calor**, o **energía térmica**, se simboliza normalmente con la letra Q y es una de las distintas formas de energía, como hemos visto al principio del subapartado 1.2. Se trata de una forma de energía "privilegiada", ya que se presenta en cualquier transformación energética. Toda la energía tiende a convertirse en energía térmica.

El calor, por su parte, se puede convertir en otras formas de energía, pero la transformación nunca es completa, como veréis más adelante (en el apartado 2.5) cuando estudiéis el primer principio de la termodinámica.

La energía térmica se manifiesta por el movimiento de las partículas de un cuerpo o material. Cuanto más movimiento tengan las partículas, más calor alcanzará el cuerpo.

Como una forma de energía que es; el calor Q tiene unidades de energía. En el Sistema Internacional de unidades se utiliza el julio (J), pero con frecuencia también se utiliza la caloría (cal).

La **caloría** se define como la cantidad de calor necesaria para elevar un grado la temperatura de un gramo de agua líquida. La equivalencia entre julios y calorías es 1 cal = 4,184 J.

Fijaos en la definición de caloría. Lo que está diciendo es que la experiencia demuestra que el trabajo realizado sobre un sistema y el calor que libera guarda siempre una relación constante e igual, con un valor aproximado de 4,18. Por tanto, por cada 4,18 julios de trabajo realizado, se comunica una cantidad de calor igual a una caloría.

Por otro lado, habréis notado que si ponéis una olla de hierro al fuego, se calienta antes que por ejemplo una de cerámica; o que resulta más fácil descongelar un trozo de carne que un bote lleno de agua. Es decir, hay materiales que se calientan o se enfrían muy deprisa y otros que tardan más. Esto se debe a dos conceptos fundamentales que veremos en los siguientes subapartados: el calor específico y el calor latente. Veremos también cómo se producen estos procesos de transmisión de calor.

1.4.1. Calor específico

Cuando varios cuerpos a distinta temperatura se ponen en contacto en un recinto, se produce transferencia de calor entre ellos y alcanzan una temperatura final de equilibrio al cabo de cierto tiempo. Cuando se ha alcanzado este equilibrio, se debe cumplir que la suma de las cantidades de calor intercambiadas sea cero, es decir, en equilibrio no hay intercambio de calor.

La relación entre el calor que gana una unidad de masa (1 kg en el Sistema Internacional de unidades) de una determinada sustancia y el aumento de temperatura que experimenta se define como calor específico y es una propiedad muy importante de los materiales que relaciona ambas magnitudes:

$$c_e = \frac{Q}{m\Delta T} \tag{6}$$

En la ecuación anterior, c_e es el calor específico, Q es la cantidad de calor intercambiada y ΔT es el incremento de temperatura.

El incremento de la temperatura, ΔT, depende de la temperatura de cada sustancia y de la temperatura final de equilibrio. De manera que, si la temperatura de la sustancia es inferior a la temperatura final de equilibrio, diremos que el cuerpo absorbe calor ($Q < 0$). En cambio, si la temperatura de la sustancia es más alta que la temperatura final de equilibrio, diremos que la sustancia cede calor ($Q > 0$).

Esta propiedad, el calor específico, es constante para intervalos de pocos grados de temperatura. La tabla 1 muestra los valores del calor específico para diferentes sustancias a 20 °C de temperatura. Y fijaos en este detalle: hay que decir a qué temperatura estamos proporcionando el valor porque el calor específico depende de la temperatura.

Tabla 1. Valores del calor específico de diferentes sustancias a 20 °C

Sustancia	c_e (J/kg · K)	c_e (cal/kg·°C)
Aluminio puro	896	214,3
Cobre puro	383	91,58
Hierro puro	452	108,1
Agua	4.184	1.000
Freón 12	965,9	230,9
Aire seco	1.012	242,0

La caloría, cal, es una unidad de medida de la energía que no pertenece al Sistema Internacional: 1 cal = 4,18 J

Como se ha comentado, el calor específico es una propiedad de los materiales. Cuando se habla de calentar o enfriar un cuerpo concreto, se habla de capacidad calorífica del cuerpo, que es la cantidad de calor que ha absorbido el cuerpo para incrementar en un grado su temperatura.

Si un cuerpo ha absorbido una cantidad *Q* de calor y ha aumentado su temperatura un ΔT (incremento de temperatura), su capacidad calorífica media se puede calcular como:

$$\text{Capacidad calorífica} = \frac{Q}{\Delta T} \qquad (7)$$

Según la fórmula (7), la capacidad calorífica, en determinadas condiciones, depende del calor absorbido (*Q*) por una sustancia y del incremento de temperatura resultante (ΔT).

La capacidad calorífica de un sistema físico depende de la cantidad de sustancia o masa de este sistema. Para un sistema formado por una sustancia homogénea de masa *m*, se define el **calor específico o capacidad calorífica específica c_e**:

$$\text{Capacidad calorífica} = mc_e \qquad (8)$$

Sustancia homogénea

Decimos que una sustancia es homogénea cuando, en ausencia de fuerzas exteriores, sus variables termodinámicas son constantes.

De las relaciones anteriores, (7) y (8), se puede deducir que al aumentar la masa de una sustancia, aumenta su capacidad calorífica y, con ello, la dificultad de la sustancia para variar su temperatura (es lo que se denomina la **inercia térmica**). Un ejemplo son las ciudades costeras en las que el mar actúa como un gran termostato y regula las variaciones de temperatura.

Capacidad calorífica del hierro

Imaginad una masa de 12 kg de hierro. ¿Cuánto calor hay que suministrar para elevar la temperatura de la masa de hierro desde 80 °C hasta 120 °C?

Para calcular la cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de 80 °C a 120 °C, debemos calcular la capacidad calorífica de esta sustancia, es decir, la capacidad calorífica dependerá de la cantidad de masa y del calor específico de la sustancia concreta según la ecuación (8):

$$\text{Capacidad calorífica} = mc_e \qquad (9)$$

Fijaos en que en este ejemplo utilizamos J/kg °C en lugar de J/kg K. En realidad, en este caso podemos utilizar ambas unidades indistintamente, ya que son julios por kilogramo y por kelvin, pero un incremento de kelvin siempre tiene el mismo valor que un incremento de grados Celsius. En otras palabras, la diferencia de temperatura tiene el mismo valor en kelvin y en grados Celsius.

La cantidad de sustancia la sabemos: 12 kg. Para conocer el calor específico del hierro, acudimos a la tabla 1, en la que el valor c_e del hierro es 452 J/kg °C. Si tenemos en cuenta estos datos, y los sustituimos en la ecuación (8), obtenemos:

$$\textit{Capacidad calorífica} = mc_e = 12\ \text{kg} \cdot 452\ \frac{\text{J}}{\text{kg}\ {}^{\circ}\text{C}} = 5.424\ \frac{\text{J}}{{}^{\circ}\text{C}} \tag{10}$$

Una vez calculada la capacidad calorífica de la masa de hierro, como el hierro aumenta su temperatura de 80 °C a 120 °C, el calor absorbido por el hierro se expresa con la ecuación (7):

$$\textit{Capacidad calorífica} = \frac{Q}{\Delta T} \tag{11}$$

Al aislar de esta ecuación el calor absorbido Q por la masa de hierro, como ya se ha calculado la capacidad calorífica y se conoce el incremento de temperatura ΔT, se obtiene:

$$Q = \textit{Capacidad calorífica} \cdot \Delta T = 5.424\ \frac{\text{J}}{{}^{\circ}\text{C}}(120-80)\ {}^{\circ}\text{C} = 5.424\ \frac{\text{J}}{{}^{\circ}\text{C}}(40)\ {}^{\circ}\text{C} \tag{12}$$

$$Q = 216.960\ \text{J} \tag{13}$$

Fijaos en que la cantidad de calor absorbida es positiva ($Q > 0$), ya que la temperatura del cuerpo es inferior a la temperatura final de equilibrio (el cuerpo absorbe calor).

1.4.2. Calor latente

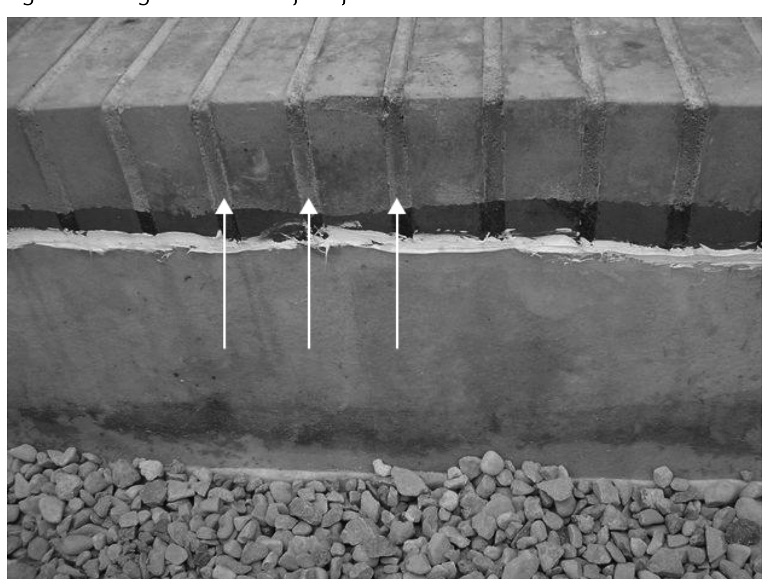
Con estas explicaciones se podría llegar a pensar que un cuerpo podría incrementar su temperatura indefinidamente. No obstante, cuando el cuerpo llega a ciertas condiciones de presión y de temperatura, se producen cambios. Todos los días se producen cambios en la materia que nos rodea. Algunas de estas transformaciones hacen cambiar el aspecto, la forma o el estado. A estos cambios los denominamos **cambios físicos de la materia**.

Por ejemplo, ¿por qué en las calles hay una franja más oscura para el pavimento? ¿Por qué los raíles de la línea de tren tienen una pequeña separación? En el caso del pavimento, las franjas o juntas de dilatación absorben los movimientos de dilatación y contracción del material causados por las variaciones térmicas y, de esta manera, evitan grietas y desperfectos (fijaos en la fotografía de la figura 1: las franjas oscuras que aparecen son las juntas de dilatación). Algo similar sucede con los raíles de las vías del tren.

Por lo tanto, podemos concluir que los cambios de volumen que sufre la materia están relacionados con la temperatura y el espacio que ocupan.

Pero los cuerpos también sufren cambios de fase, es decir, pasan de sólido a líquido y viceversa. Estos cambios de fase entre los tres estados de la materia también implican un intercambio de energía.

Figura 1. Fotografía de las franjas o juntas de dilatación



La flechas indican la posición de las juntas de dilatación.

Entre los cambios físicos más importantes tenemos los cambios de estado, que son los cambios que se producen por transmisión del calor.

Los cambios de fase también producen un intercambio de energía entre los tres estados de la materia: sólido, líquido o gaseoso. De manera que el cuerpo pasará de sólido a líquido o a gas y de líquido a gas, y absorberá energía en cada paso:

- calor de fusión en el paso de sólido a líquido;
- calor de sublimación en el paso de sólido a gas, y
- calor de vaporización en el paso de líquido a gas.

Estos calores son característicos de cada material y dependen de las condiciones de presión y de temperatura.

El paso contrario, es decir, de gas a líquido o sólido, y de líquido a sólido se realiza cediendo energía:

- calor de solidificación en el paso de líquido a sólido;
- calor de sublimación inversa en el paso de gas a sólido, y
- calor de condensación en el paso de gas a líquido.

En la figura 2 tenéis un esquema de los diferentes cambios de fase que pueden producirse en la materia.

Hemos visto que, cuando se produce una transmisión de calor de un cuerpo a otro, este calor depende del calor específico de la sustancia o cuerpo y de la variación de temperatura.

Figura 2. Esquema de los cambios de fase entre los diferentes estados de la materia

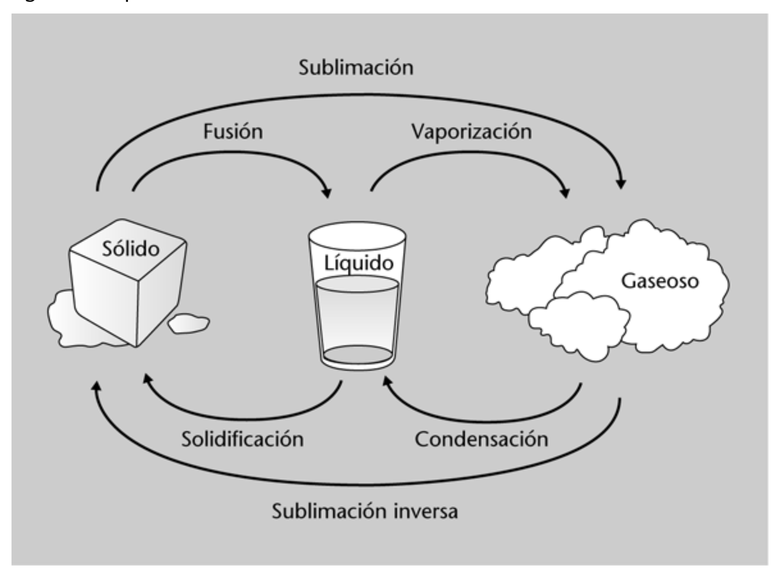


Figura 2

Se muestra que el calor de fusión sirve para pasar del estado sólido al líquido (a la inversa, el calor de solidificación); el de vaporización para pasar del estado líquido al gaseoso (a la inversa, el calor de condensación), y el del estado sólido al gaseoso es el calor de sublimación (a la inversa, el de sublimación inversa).

Cuando se produce una transferencia de calor que hace cambiar el aspecto de la materia, este calor depende de la cantidad de masa y de lo que se conoce como *calor latente* causado por el cambio de estado físico que se produce en la sustancia.

Matemáticamente:

$$Q = mc_l \tag{14}$$

donde m es la masa de la sustancia y c_l es el calor latente del cambio de fase o estado.

Es importante que tengáis en cuenta que el proceso de cambio de estado se realiza a temperatura constante. Por ejemplo: un trozo de hielo, al fundirse a la temperatura de fusión, mantiene la temperatura de 0 °C (en forma de hielo y después en forma de líquido). En este cambio de estado debe recibir una cantidad importante de calor, sólo para fundirlo, no para cambiar la temperatura: aquí la sustancia obedece a una característica conocida como **calor latente de fusión (C_f)**, y la del hielo es de 334 J/g.

La propia agua, si se continúa calentando, podrá evaporarse. Al alcanzar la temperatura de vaporización (100 °C a nivel del mar) pasará a vapor, después de que se le hayan aplicado 2.260 julios de calor por cada gramo. Este valor corresponde al **calor latente de vaporización (C_v)**. Es decir, el sistema necesita un aporte de energía para invertirlo en el cambio de estado, y sólo en esto. Cuando cambia de estado no cambia la temperatura. Una vez que el estado ha cambiado, la temperatura puede continuar variando.

Si el proceso fuese al revés de como se ha plantado, es decir, de líquido a sólido, la propiedad de la materia que se debe utilizar en este nuevo cambio de es-

tado sigue siendo el calor latente de fusión y, en el caso del paso de gas a líquido, sigue siendo el calor latente de vaporización.

El calor latente de un cubito

Supongamos un cubito de hielo de 50 g. El cubito está a 0 °C y queremos obtener agua. En este caso, necesitamos aportarle la cantidad de calor necesaria para que el hielo pase del estado sólido al estado líquido (agua). El hielo experimenta un cambio de estado y para calcular el calor aplicaremos la ecuación (14):

$$Q = mc_l \qquad (15)$$

Es decir, cuando se produce una transferencia de calor que hace cambiar el aspecto de la materia, este calor depende de la cantidad de masa de la sustancia y de lo que se conoce como calor latente, c_l, causado por el cambio de estado físico que se produce en la sustancia. El calor latente de fusión del hielo son 334 J/g y, dado que la masa de hielo es de 50 g, al aplicar la ecuación (14) se obtiene:

$$Q = mc_l = 50\,g \cdot 334\ \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{g}} = 16.700\ \mathrm{J} \qquad (16)$$

En conclusión, para fundir una masa de 50 g de hielo es necesario aportar 16.700 julios.

1.4.3. Transmisión del calor

Hasta ahora, hemos introducido el concepto de *calor* como una transferencia de energía. Por lo tanto, el flujo de calor se produce entre dos cuerpos porque tienen diferente temperatura.

Pero ¿cómo se realizan estos procesos de transmisión de la energía en forma de calor? El proceso de transmisión de calor se puede llevar a cabo por medio de diferentes mecanismos, como la conducción, la convección y la radiación.

Aunque estos tres procesos pueden tener lugar simultáneamente, puede suceder que uno de los tres mecanismos predomine sobre los otros dos. Por ejemplo, el calor que se transmite a través de la pared de una casa lo hace fundamentalmente por conducción; el agua de un cazo situado encima de un quemador de gas se calienta preferentemente por convección, y la Tierra recibe el calor del Sol casi exclusivamente por radiación.

A continuación veremos cada uno de estos procesos por separado.

Conducción

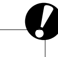
En los sólidos, la única transferencia de calor se realiza por conducción. Por ejemplo, si tenemos una varita metálica y ésta se calienta por uno de sus extremos, comienza a aumentar la temperatura y el calor se transmite hacia el extremo más frío por conducción. La transferencia de calor se produce por el movimiento de los electrones que transportan energía cuando hay una diferencia de temperatura. Por este motivo, usamos cucharas de madera en la cocina en lugar de metal, porque tienen menor conductividad térmica.

> La conducción del calor es un mecanismo de transferencia de energía térmica entre dos sistemas basado en el contacto de sus partículas sin flujo de materia y que tiende a igualar la temperatura entre dos puntos.

La conducción se explica microscópicamente porque las partículas de un cuerpo que tienen más temperatura, y por lo tanto con más energía cinética, transfieren su movimiento al resto de las partículas que tienen menos temperatura. La ley que describe la transmisión del calor por conducción es una ley experimental.

Microscópicamente

Microscópicamente se refiere a los niveles de las redes cristalinas, moléculas y átomos, y para su completa descripción se requiere el uso de la mecánica cuántica.



Recordad que la energía cinética se estudia en el módulo "Mecánica" de esta asignatura y se debe al movimiento de los cuerpos.

Existe un parámetro que depende del tipo de material y que regulará la capacidad de transmisión del calor por conducción: es la conductividad térmica *k*. En el Sistema Internacional, las unidades de la conductividad son los watts por metro y por kelvin (W/(m K)) o los julios por segundo, por metro y por kelvin (J/(s m K)).

Watts

Los watts se definen como julios por segundo:

1 W = 1 J/s

Si se es riguroso, la conductividad térmica es una propiedad inherente al tipo de material y dependerá de la temperatura. A una temperatura más alta se produce un mayor movimiento de las moléculas que conforman el material (recordad el apartado 1.2, en el que se explicó el calor) y se podrá transmitir más fácilmente la energía cinética. Por lo tanto, en función de cómo sea la conductividad térmica, se pueden clasificar los tipos de materiales en:

1) **Conductores**: si tienen una conductividad alta, los materiales serán buenos **conductores**. Normalmente, los metales tienen una conductividad alta y son buenos conductores del calor.

Conductividad térmica

En este apartado se hace referencia a la conductividad térmica y no a la conductividad eléctrica del módulo de electromagnetismo.

2) **Aislantes**: los materiales que tienen una conductividad baja se denominan **aislantes** y se consideran malos conductores del calor (por ejemplo, el corcho o el poliéster son aislantes).

Para verlo en un caso práctico, cuando ponemos a calentar una olla metálica, se calienta muy rápido. Si colocamos un trapo sobre la olla, la temperatura que alcanzará el trapo no tiene nada que ver con la que alcanza la olla.

La tabla 2 muestra la capacidad de ciertos materiales para transmitir el calor, es decir, el coeficiente de conductividad térmica *k*.

Tabla 2. Valores de conductividad *k* para diferentes materiales (expresada en W/(m K))

Material	*k* (W/m K)
Cobre puro	401
Aluminio	237
Vidrio	0,81
Plástico	0,25
Hormigón	1,2

Material	k (W/m K)
Corcho	0,043
Polietileno rígido	0,023
Agua	0,6
Aire	0,026

Es importante resaltar que en la tabla 2 no sólo aparecen materiales sólidos, también aparece la conductividad de ciertos fluidos, como el agua o el aire, aunque, en la mayoría de los casos, la transmisión del calor en los fluidos se realiza por convección (como veremos en el apartado siguiente).

En la práctica se pueden considerar como materiales aislantes aquellos que presentan una conductividad térmica inferior a 0,175 W/(m K).

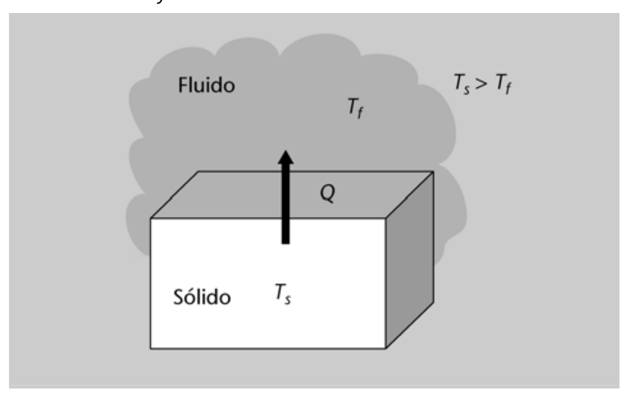
Convección

La segunda posibilidad para transmitir calor es la convección, que es característica de las situaciones en las que está presente un fluido (gases o líquidos).

> La convección del calor es un sistema de transmisión de energía característica de los fluidos (gases y líquidos). Se produce cuando éstos absorben calor en una porción y después esta porción se desplaza y se mezcla con otra más fría y le cede calor. Este movimiento se denomina **corriente de convección**.

La conducción del calor dentro del fluido resulta muy compleja de entender y de estudiar. El movimiento de las partículas dentro del fluido a diferentes temperaturas lleva el calor a diferentes puntos del dominio del fluido. Esto significa que a las ecuaciones de conducción del calor que describen el problema hay que añadir las ecuaciones de continuidad y de conservación de la energía del fluido. Estas situaciones son muy complicadas de resolver analíticamente y sólo es posible resolverlas en casos muy concretos de convección y para ello es necesario utilizar métodos numéricos y ordenadores.

Figura 3. Esquema de la transmisión de calor por convección entre un fluido y un sólido



En la figura 3 podéis ver un esquema de transmisión de calor por convección entre un fluido y un sólido. Cuando un fluido está en contacto con una pared sólida de más temperatura, aunque el fluido presente un movimiento turbulento, junto a la pared se forma una película de fluido. Esta película o capa se denomina *capa límite*. El fluido que está en movimiento turbulento se lleva el calor. Cuanto más turbulento es el movimiento, más delgada es la película.

Movimiento turbulento

Un movimiento turbulento es un movimiento desordenado de las partículas dentro del fluido.

El fenómeno de transmisión de calor de la pared al fluido se realiza por conducción a través de la película y, al mismo tiempo, por convección del fluido. En conjunto, el fenómeno es complejo porque la cantidad de calor transmitida dependerá de varios factores concurrentes, como:

- la naturaleza del fluido;
- el estado del fluido (densidad, calor específico y conductividad térmica);
- la velocidad del fluido (si es lenta, el movimiento será laminar, y si es rápida, será turbulenta);
- el intercambio de calor (puede provocar evaporación, condensación o formación de la película);
- la forma del sólido (pared plana o curva, vertical u horizontal);
- la naturaleza de la superficie (rugosa o lisa), y
- la conductividad del sólido (que sea buen o mal conductor).

Movimiento laminar

Un movimiento laminar es aquel en el que las partículas están ordenadas y se desplazan como si fuesen superficies.

El estudio térmico de la convección se simplifica a partir del **coeficiente medio de transmisión de calor por convección**, α, descrito a partir de la expresión siguiente:

$$\frac{Q}{t} = \alpha \cdot S \cdot (T_s - T_f) \quad (17)$$

donde Q/t es el calor que se transfiere en el proceso de convección, α es el coeficiente de convección, S es la sección a través de la cual se produce la convección, T_s es la temperatura del sólido y T_f es la temperatura del fluido.

Recordad

La letra α es la letra griega alfa minúscula.

Las unidades de este coeficiente, en el Sistema Internacional de unidades, son $W/(m^2K)$.

El coeficiente α se determina experimentalmente. En la tabla 3 tenéis diferentes valores y órdenes de magnitud del valor del coeficiente de transmisión por convección en condiciones usuales.

Tabla 3. Valores del coeficiente de transmisión de calor por convección en las situaciones más usuales

Clase de convección	α ($W/(m^2K)$)
Convección natural, aire	Entre 5 y 50
Convección natural, agua	Entre 10 y 100
Convección forzada, aire	Entre 10 y 200
Convección forzada, agua	Entre 50 y 10.000

En la tabla aparecen dos clases de transmisión por convección: la convección natural y la convección forzada.

1) La **convección natural** se produce cuando el fluido está en reposo y adquiere movimiento a causa de las diferencias de densidad causadas por el calentamiento de algunas de sus moléculas. Este calentamiento se debe a la transmisión de calor. El movimiento del fluido a gran escala se manifiesta en fenómenos como el viento y las corrientes marinas y, a pequeña escala, la convección natural se crea en el movimiento de un líquido mientras se calienta en un recipiente, de manera que el calor se reparte por todo el líquido. Este tipo de convección lo provocan las diferencias de densidad causadas por las diferencias de temperatura.

2) La **convección forzada** se produce cuando el movimiento del fluido que intercambia calor se crea por medios mecánicos: un ventilador, una bomba, etc. Podéis ver en la tabla 3 cómo los valores de los coeficientes de la convección forzada producen efectos cuantitativamente más importantes y, a menudo, esta convección se produce en situaciones en las que se quiere incrementar el flujo del calor. Por ejemplo, cuando un coche está durante un tiempo parado con el motor en marcha, se pone en funcionamiento el ventilador y así se fuerza la convección con el aire del exterior y se favorece que el líquido que evacua el calor del motor ceda este calor al aire. Cuando el coche está en movimiento y pasa aire a cierta velocidad hacia el radiador, no es necesario forzar la circulación del aire con el ventilador, pero igualmente se trata de un caso de convección forzada.

Cuando tenemos un sólido y un fluido en contacto, también se produce transmisión de calor por convección y, en este caso, hay una resistencia térmica. La resistencia térmica debida a la convección entre un sólido y un fluido se determina a partir de la expresión siguiente:

$$R_{T,convección} = \frac{1}{\alpha \cdot S} \tag{18}$$

donde R_T es la resistencia térmica por convección y se mide en ohms (Ω); α es el coeficiente de convección y se mide en W/(m^2 K), y S es la sección (la superficie) por la que se produce la convección.

Para disminuir la resistencia térmica de convección y favorecer el intercambio de calor entre un sólido y un líquido, con el supuesto de que no se puede modificar (aumentar) el valor de α, la única solución es incrementar la superficie S de intercambio. Otra solución posible consiste en aumentar la superficie exterior mediante extensiones, que es lo que se conoce como **aletas**.

La convección también se produce en el aire caliente que se eleva. Algunos ejemplos son:

- al calentarse, el aire que descansa sobre un radiador se expande, por lo que disminuye su densidad y se eleva;

- las corrientes oceánicas frías son un ejemplo de convección natural a gran escala;
- el viento es otro ejemplo de convección y el clima, en general, es el resultado de corrientes de aire, y
- cuando se calienta con agua se producen corrientes de convección. A medida que el agua caliente del fondo sube, a causa de su menor densidad, se sustituye por el agua más fría de la parte superior. Este principio se utiliza en muchos sistemas de calefacción, normalmente en los sistemas que utilizan radiadores de agua caliente.

Pero también podemos sentir la convección: pensad en la sensación de frío que tenemos cuando se produce un viento fuerte (que según los meteorólogos se puede asimilar a dos grados menos de temperatura), a diferencia de la que tenemos cuando no hay viento.

Radiación

Todos los cuerpos, sea cual sea su temperatura, emiten energía de manera continua desde su superficie. Esta energía, denominada *energía radiante*, la transportan ondas electromagnéticas. Por este motivo, la energía radiante se puede transmitir también en el vacío.

> La emisión continua de energía radiante por un cuerpo se denomina **radiación**.

Como consecuencia de este fenómeno, dos cuerpos colocados en el vacío y que están a diferente temperatura alcanzan el equilibrio térmico debido a que el de menor temperatura recibe energía radiante del otro cuerpo, de mayor temperatura. Cuando un cuerpo absorbe energía radiante, ésta se transforma en calor. Asimismo, los cuerpos también pueden reflejar (difundir) o refractar (propagar).

Pese a que todos los cuerpos radian (emiten energía radiante), trataremos únicamente la energía radiante emitida por los sólidos y los líquidos, ya que la emitida por los gases obedece a leyes muy diferentes y queda más allá de los objetivos de este módulo.

Hemos dicho que la energía radiante se transmite por ondas electromagnéticas. Por lo tanto, su velocidad de propagación en el vacío será la de la luz (299.792,458 m/s en el vacío). Ya habéis visto en el módulo de ondas que las ondas electromagnéticas comprenden las ondas de radio, las ondas infrarrojas, la luz visible, las ondas ultravioletas y los rayos X y γ; todas ellas difieren sólo en su longitud de onda.

Recordad

γ es la letra griega gamma minúscula y se lee "gamma".

Los cuerpos sólidos y líquidos emiten energía radiante que contiene ondas de todas las frecuencias cuyas amplitudes dependen principalmente de la temperatura del cuerpo emisor y no del tipo de moléculas que lo forman. En cambio,

los gases emiten energía radiante en un número relativamente bajo de frecuencias, que son características de las moléculas del gas.

Toda la materia del cuerpo emite energía radiante, pero, en general, en su interior, la energía emitida por cada punto es de nuevo absorbida por el propio cuerpo y por ello la energía que se libera corresponde sólo a una capa fina de la superficie del cuerpo. Es importante señalar que la energía emitida no sólo depende de la temperatura de la superficie, sino también de su naturaleza.

Como curiosidad, los humanos notamos más la radiación que la temperatura ambiente, es decir, si estamos en una sala con el aire a 20 °C, pero el techo o una pared están a 50 °C por la radiación solar, nunca tendremos sensación de confort. Lo mismo ocurre si la pared está fría, como en el caso de los edificios acristalados.

1.5. Diferencia entre calor y temperatura

Después de explicados los conceptos de *calor* y *temperatura*, se podría llegar a pensar que calor y temperatura significan lo mismo y, por lo tanto, nos preguntaremos: ¿cómo podemos diferenciar entre el concepto de *calor* y el de *temperatura*?

El calor y la temperatura son conceptos que están relacionados entre sí, pero son muy diferentes:

- El calor es la energía total del movimiento de las moléculas que forman una sustancia, mientras que la temperatura es una medida de esta energía molecular media.

- El calor depende de la velocidad de las partículas, del número, del tamaño y del tipo que sea. Por su parte, la temperatura no depende del tamaño. Por ejemplo, la temperatura de un vaso pequeño de agua puede ser la misma que la temperatura de un cubo de agua, pero el cubo tiene más calor porque contiene más cantidad de agua y, por lo tanto, más energía térmica total.

En resumen, afirmaremos que la temperatura no es energía, sino una medida de ésta. Por su parte, el calor sí es energía.

1.6. ¿Qué hemos aprendido?

En este apartado hemos aprendido:

- los conceptos de calor y temperatura y cómo diferenciarlos;
- el concepto de energía;
- cómo se mide la temperatura;
- cómo se mide el calor, y
- que existen diferentes mecanismos de transferencia del calor.

Una vez definidos los conceptos de energía y calor continuaremos introduciendo conceptos básicos de termodinámica, como la definición de sistema termodinámico, frontera, entorno, etc. Todo ello nos permitirá acabar con unas leyes fundamentales de la física, las leyes de la termodinámica, que nos permitirán entender los procesos energéticos, naturales y artificiales, que tienen lugar a nuestro alrededor.

2. Leyes de la termodinámica

Hemos visto e introducido la termodinámica como una parte de la física que se ocupa de estudiar la energía y sus transformaciones. Hemos visto que esta energía se puede convertir en trabajo (apartado 1.1) y hemos visto que, en las transformaciones de energía, una parte de ésta se transforma en calor (subapartados 1.2 y 1.4).

Ésta es, de hecho, la orientación histórica, ya que la termodinámica data del siglo XIX y nace por la necesidad de mejorar el rendimiento de las primeras máquinas térmicas fabricadas durante la Revolución Industrial.

El punto de partida de la mayor parte de las consideraciones termodinámicas son, sin embargo, las denominadas leyes o principios de la termodinámica. Por decirlo de un modo sencillo, estas leyes definen cómo tienen lugar las transformaciones de energía. Y, con el tiempo, estas leyes se han convertido en unas de las más importantes de la ciencia.

En este apartado estudiaremos los principios de la termodinámica. Sin embargo, antes es necesario introducir o recordar algunas nociones y conocimientos preliminares: el concepto de sistema termodinámico, qué son las variables extensivas e intensivas, qué es el equilibrio termodinámico y a qué nos referimos cuando hablamos de estado de un sistema termodinámico. En este apartado introduciremos de forma escueta estos elementos, pero en los posteriores los desarrollaremos con más detalle.

¿Qué aprenderemos?

En este apartado veréis algunos conceptos propios de la termodinámica que nos llevarán a definir las tres leyes de ésta. En particular:

- veremos conceptos nuevos, como la energía interna y la entropía;
- veremos conceptos cotidianos, pero os los mostraremos desde un punto de vista físico, como la presión y el volumen;
- también estableceremos las bases de un sistema termodinámico y cómo éstos se definen y representan;
- finalmente, os mostraremos las tres leyes de la termodinámica.

¿Qué supondremos?

Para el estudio de este apartado supondremos que habéis asimilado los conceptos de trabajo y energía del módulo de cinemática y dinámica y que sabéis interpretar gráficos.

2.1. Conceptos básicos de termodinámica

En este apartado estudiaremos los conceptos de sistema termodinámico, variables extensivas e intensivas, equilibrio termodinámico y estado de un sistema termodinámico. Dado que todos estos conceptos están relacionados, volveremos a ellos constantemente. Comenzaremos por lo tanto con una definición concisa y veremos cómo están relacionados. Esto nos permitirá empezar a trabajar con ellos y después, más adelante, ya os mostraremos con detalle su definición.

Dicho esto, comenzamos mostrándoos la relación entre ellos. Podéis ver la figura 4:

- Un **sistema termodinámico** es aquel sistema objeto de estudio. El estado de un sistema termodinámico queda definido por unas variables que son la presión (*P*), el volumen (*V*) y la temperatura (*T*), y que se denominan **variables de estado**. Si estas variables no varían, se dice que el sistema termodinámico está en equilibrio.

- Una **función de estado** es una propiedad de un sistema termodinámico que depende sólo del estado del sistema y no del modo como el sistema llegó a dicho estado.

Figura 4. Cuadro resumen de todos los conceptos introducidos y cómo se relacionan

El esquema de la figura 4 muestra que un sistema termodinámico está definido por sus variables termodinámicas y que, si éstas no varían, el sistema está en equilibrio. Un sistema termodinámico en equilibrio viene definido por sus ecuaciones de estado. Pero un sistema termodinámico puede sufrir transformaciones termodinámicas con el aporte o la cesión de parte de su energía. Estas transformaciones de energía están relacionadas con el primer principio de la termodinámica. Esto es precisamente lo que veremos en este apartado, y así ya habéis visto por qué debíamos introducir antes estos conceptos.

Sin embargo, aún hay otros elementos que necesitamos y que son clave para enunciar los principios de la termodinámica: los conceptos de energía interna y de entropía.

2.1.1. Energía interna y entropía

A continuación definiremos dos conceptos que son fundamentales para enunciar los principios de la termodinámica: la energía interna y la entropía.

Energía interna

La energía interna (*U*) de un sistema es la energía contabilizada por la suma de la energía cinética de las moléculas y los átomos que constituyen el sistema, la energía de rotación y la energía de vibración, además de la energía potencial entre las moléculas (recordad los tipos de energía que habéis visto en el módulo de mecánica).

La energía interna es una función de estado porque no se puede conocer su valor absoluto, sólo se pueden conocer sus estados inicial y final.

Entropía

El concepto de entropía se entiende como una definición del desorden. El desorden de un sistema aislado nunca puede decrecer. Por lo tanto, cuando un sistema aislado alcanza una configuración de máxima entropía, ya no puede experimentar cambios, puesto que ha alcanzado el equilibrio. La naturaleza parece que prefiere el desorden y el caos.

La entropía *S* es una función de estado del sistema. Tiene un valor único para cada estado de equilibrio, independientemente de cómo se llegó a dicho estado. Según su definición, la entropía está relacionada con magnitudes que son medibles y que se estudiarán en el segundo principio de la termodinámica.

2.1.2. Sistemas termodinámicos

Fijaos en que hasta ahora hemos hablado del concepto de energía como una forma de trabajo y cómo este trabajo se transforma en diferentes formas de energía. Principalmente, hemos hablado de la energía como la transferencia de calor o energía térmica en un determinado sistema. Los sistemas que son objeto del estudio de la termodinámica se denominan sistemas termodinámicos.

Para entenderlos, definiremos qué es un sistema termodinámico y sus partes.

> Se define un **sistema termodinámico** como una región del espacio que es objeto de estudio. Las partes de un sistema termodinámico son el universo, la frontera y el entorno.

Los límites del sistema se denominan **frontera** y están definidos por una superficie arbitraria. La frontera puede ser real o imaginaria, puede estar en reposo o en movimiento y puede cambiar su forma o medida.

El **entorno** es la región del espacio que está fuera de la frontera y es la región del espacio que, sin ser parte del sistema, interactúa de alguna manera con él.

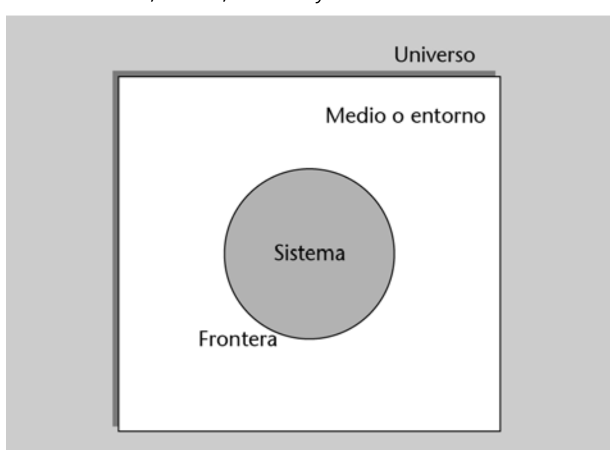
El **universo** es el conjunto del sistema y el entorno.

Al comenzar cualquier análisis de termodinámica hay que definir el sistema, la frontera y el entorno.

Por ejemplo, consideremos un dispositivo formado por un émbolo y un cilindro. Supongamos que dentro del cilindro tenemos un gas encerrado y queremos saber qué es lo que le sucede al gas cuando se calienta. En este caso, el gas es nuestro sistema termodinámico, puesto que centramos nuestra atención en conocer qué es lo que le sucederá al gas cuando aumente su temperatura. Las superficies del cilindro y émbolo formarán la frontera. Todo lo que queda fuera del gas constituye su entorno.

En la figura 5 podéis ver un esquema de las partes de un sistema termodinámico como un conjunto de elementos (sistema, frontera, entorno y universo), de manera que el sistema será cualquier objeto, cantidad de materia o región del espacio en estudio y estará aislado de todo lo demás. Así, todo lo que rodea al sistema es el entorno en el que se halla el sistema. Y el conjunto de sistema y entorno se define como universo.

Figura 5. Representación esquemática de un sistema termodinámico, medio, frontera y universo



La envoltura real o imaginaria que encierra un sistema y lo separa, que lo aísla de sus inmediaciones (entorno), se denomina frontera del sistema. Por otro lado, es importante definir la frontera como una superficie y no como otro sistema; debéis tener muy claro que el espesor de una superficie es matemáticamente cero, razón por la que la frontera no puede ni contener materia, ni ocupar ningún lugar en el espacio.

Por ejemplo, si queréis estudiar un refrigerador, la frontera del sistema termodinámico sería toda la superficie externa del refrigerador y todo lo que

hay en el interior de este refrigerador sería nuestro sistema. Asimismo, si sólo queréis estudiar el funcionamiento del compresor, el propio compresor sería el sistema termodinámico.

Una vez definido el concepto de sistema termodinámico y de qué partes consta, pasaremos a describir cómo se clasifican los sistemas termodinámicos.

2.1.3. Clasificación de los sistemas termodinámicos

En termodinámica nos centraremos en el estudio del sistema termodinámico y, en concreto, del interior del sistema. Para definir el interior del sistema utilizaremos una serie de magnitudes, como la presión (P), el volumen (V) y la temperatura (T). Estas magnitudes describen el estado, pero para estudiarlo necesitamos definir y clasificar los sistemas termodinámicos.

Los sistemas termodinámicos se pueden clasificar en aislados, cerrados y abiertos.

1) **Sistema aislado**: es aquel sistema en el que no existe intercambio ni de masa ni de energía con los alrededores.

Pero, entonces aparece la pregunta: si no tenemos intercambio o transferencia de materia o energía, ¿cómo podemos interactuar con el sistema?, es decir, ¿cómo nos podemos encontrar con un sistema aislado si no podemos interactuar con él?

Lo cierto es que esto es una aproximación: en realidad existen muchos sistemas que, a efectos termodinámicos, se pueden considerar aislados. Por ejemplo, un termo lleno de comida caliente se puede considerar una buena aproximación de sistema aislado desde el punto de vista termodinámico. Fijaos en que el envase no permite cambio de materia e intenta impedir que la energía, en forma de calor, salga del sistema.

2) **Sistema cerrado o masa de control**: es aquel sistema que no tiene flujo de materia a través de su frontera, aunque puede haber flujo de energía con el medio circundante.

Por ejemplo, un reloj de cuerda se podría considerar un sistema cerrado porque no introducimos ni extraemos materia en él, pero necesita un aporte de energía para poder medir el tiempo.

3) **Sistema abierto o volumen de control**: es aquel sistema en el que puede haber flujo de materia y energía a través de su frontera, que en ese caso se denomina superficie de control.

Por ejemplo, un coche se puede considerar un sistema abierto. Le ponemos combustible y desprende diferentes gases y calor.

En la figura 6 tenéis un ejemplo esquemático de la clasificación de los sistemas termodinámicos. Fijaos en que nos encontramos en un entorno y en él se pueden observar los esquemas de los diferentes tipos de sistemas: un sistema abierto puede intercambiar materia y energía con el exterior; un sistema cerrado no puede intercambiar materia con el exterior pero sí puede intercambiar energía, y, finalmente, un sistema aislado no intercambia ni materia ni energía con el exterior.

Figura 6. Dibujo esquemático de un sistema cerrado, uno abierto y uno aislado

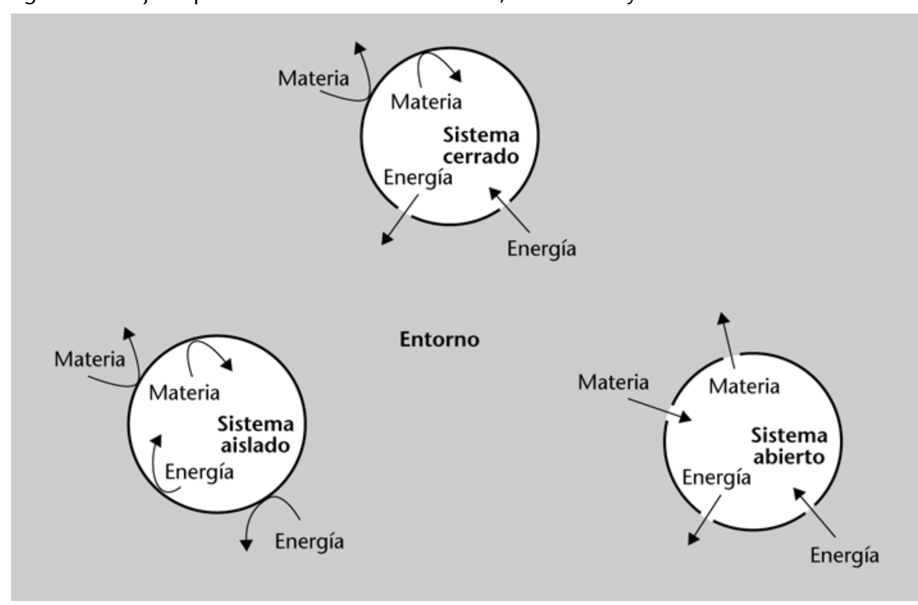


Figura 6

Se pueden observar los esquemas de los diferentes tipos de sistemas. Un sistema abierto puede intercambiar materia y energía con el exterior; un sistema cerrado no puede intercambiar materia con el exterior pero sí energía; un sistema aislado no intercambia ni materia ni energía con el exterior.

En la figura 6 es interesante que os fijéis en el sentido de las flechas, que nos indican precisamente si se da esta transferencia de materia o de energía para cada uno de los tipos de sistemas termodinámicos.

2.1.4. Concepto de presión y de volumen

En un sistema termodinámico, las variables que definen el sistema y su estado son la masa (m), la presión (P), el volumen (V) y la temperatura (T). Ya conocéis los conceptos de masa y temperatura que se han definido anteriormente: la masa en el módulo de mecánica y la temperatura en el apartado 1.3. Sin embargo, aún no hemos definido dos conceptos imprescindibles para la termodinámica, como son la presión y el volumen. Aunque tenemos una referencia coloquial de estos conceptos, no tenemos de ellos ninguna definición física.

El concepto de *masa* se define en el módulo "Mecánica" de esta asignatura.

Presión

Desde el punto de vista de la física, la **presión** (P) es una magnitud intensiva que se define como la fuerza por unidad de área o superficie:

$$P = \frac{F}{S} \quad (19)$$

La unidad de medida de la presión en el Sistema Internacional es el pascal, que se define como un newton por metro cuadrado: 1 Pa = 1 N/m^2.

Vale la pena comentar que normalmente se utilizan otras unidades de presión:

- la atmósfera (símbolo atm):

$$1 \text{ atm} = 1{,}013 \cdot 10^5 \text{ Pa} \tag{20}$$

- el bar (símbolo bar):

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} \tag{21}$$

- milímetros de mercurio (símbolo mmHg):

$$1 \text{ mmHg} = 1{,}33 \cdot 10^2 \text{ Pa} \tag{22}$$

Atmósfera

La presión de 1 atm corresponde a la presión que realiza la atmósfera terrestre sobre el nivel del mar.

Mercurio

El símbolo Hg corresponde al elemento mercurio.

Recordad

Una magnitud es intensiva cuando, para un sistema en equilibrio dividido en partes, la magnitud global no es la suma de las magnitudes de cada una de las partes que confinan el sistema (como la temperatura).

Una magnitud es extensiva cuando, para un sistema en equilibrio dividido en partes, la magnitud global es la suma de las magnitudes de cada una de las partes (como el volumen).

Volumen

El **volumen** (*V*), desde el punto de vista de la física, es una magnitud extensiva definida como la propiedad que tienen los cuerpos de ocupar un determinado espacio. La unidad de medida del volumen en el Sistema Internacional es el metro cúbico (m^3).

En el caso del volumen también se utilizan otras unidades, como el litro (símbolo l), que es igual a un decímetro cúbico (dm^3, 1 m^3 = 1.000 l = 1.000 dm^3).

Y ahora ya tenemos todas las herramientas necesarias para definir un estado termodinámico.

2.2. Estado de un sistema termodinámico

Hasta ahora hemos hablado varias veces de sistema termodinámico, pero ¿por qué nos hemos entretenido explicando otros conceptos antes? La respuesta es que un sistema termodinámico queda definido en función de unas variables o magnitudes termodinámicas, como la presión (*P*), el volumen (*V*) y la temperatura (*T*), que adquieren unos valores fijos. Mientras el valor de las variables no cambie, el estado del sistema termodinámico tampoco lo hará.

Si se produce un cambio en el sistema a causa de un proceso termodinámico, este cambio queda definido cuando se indica el estado inicial y final y cómo se realiza el proceso. Es decir, cuál es la trayectoria o el camino para pasar de un estado inicial a otro final.

Es fundamental que tengáis en cuenta que las variables termodinámicas sólo están definidas cuando el sistema termodinámico está en equilibrio termodinámico. El concepto de equilibrio termodinámico ha salido varias veces, pero ¿qué significa que un sistema termodinámico esté en equilibrio termodinámico?

Un sistema termodinámico está en equilibrio termodinámico si se producen simultáneamente las tres situaciones siguientes:

- primero, que haya equilibrio térmico, es decir, que la temperatura no cambie, sino que se mantenga constante;

- segundo, que haya equilibrio químico, es decir, que la composición del sistema tampoco cambie, y

- tercero, y último, que haya un equilibrio mecánico, es decir, que no se produzcan movimientos en el sistema.

En resumen, podríamos decir que el estado de un sistema es la condición determinada por los valores de sus propiedades. Y estas propiedades sólo están definidas cuando el sistema está en equilibrio.

Una vez hemos visto qué es un sistema termodinámico, veremos qué tipos de procesos termodinámicos existen.

2.3. Tipos de procesos termodinámicos y diagramas *T-S*

Cuando hablamos de un sistema termodinámico (recordad que el sistema termodinámico es la región del espacio en estudio), el sistema se encuentra en un determinado estado en el que las variables presión (*P*), volumen (*V*) y temperatura (*T*) están perfectamente definidas. Estas variables pueden evolucionar de un estado a otro mediante un proceso termodinámico. Desde el punto de vista de la termodinámica, estas transformaciones deben transcurrir desde un estado de equilibrio inicial a otro de equilibrio final. Es decir, las magnitudes que sufren una variación al pasar de un estado a otro deben estar perfectamente definidas en el estado inicial y final.

Para la descripción de las transformaciones que se pueden producir entre los sistemas termodinámicos y su entorno, se define el contorno termodinámico.

El **contorno termodinámico** es un conjunto de paredes cerradas que, además de delimitar y confinar el sistema, informa sobre los estados de equilibrio del sistema con el resto del universo.

La evolución de los sistemas sólo se puede realizar entre estados de equilibrio. Esta evolución recibe el nombre de **cuasiestática** y permite conocer, en cualquier instante, las propiedades intrínsecas del sistema.

Las paredes termodinámicas que ponen en contacto varios sistemas termodinámicos se pueden clasificar en **paredes restrictivas** o ligaduras y **paredes permisivas** o contactos.

1) Las paredes restrictivas o ligaduras pueden ser:

a) **Adiabáticas**: si no permiten el intercambio de energía térmica (o calor).

b) **Rígidas**: si no se pueden desplazar, es decir, cuando el volumen del sistema no puede variar.

c) **Impermeables**: si no permiten el paso de materia.

2) Las paredes permisivas o contactos pueden ser:

a) **Diatérmanas (o diatérmicas)**: si permiten el paso de energía térmica.

b) **Móviles**: si se pueden desplazar.

c) **Permeables**: si permiten el paso de materia.

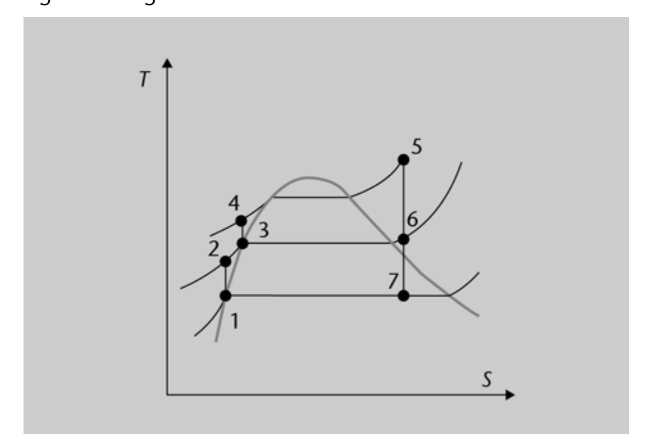
El tipo de pared afectará al tipo de proceso que tenga lugar en ésta. Estos procesos se describen con diferentes tipos de diagramas, de entre los que destacan:

- en termodinámica se usan los diagramas *P*-*V* (presión-volumen);
- en ingeniería, en general, y en el estudio de diferentes tecnologías energéticas, en particular, se suelen utilizar los diagramas *T*-*S* (temperatura-entropía), que son los que nos interesan en este módulo y, por lo tanto, los que describiremos a continuación.

2.3.1. Diagramas *T*-*S*

La definición de la variable de estado entropía (podéis ver el apartado 2.1.1) permite introducir una nueva representación gráfica de los procesos termodinámicos: el diagrama de temperatura (en K) y entropía (en J/K kg). Este diagrama es el más indicado para el estudio de las máquinas térmicas. En la figura 7 tenéis un diagrama *T*-*S*. Fijaos en que a medida que aumenta la entropía, aumenta la temperatura, hasta un máximo, desde el que comienza a disminuir. Las líneas finas en el diagrama representan otros procesos (a temperatura constante, a entropía constante, etc.).

Figura 7. Diagrama *T-S* de un ciclo de Rankine



Una de las propiedades más importantes de este diagrama es que las áreas del diagrama corresponden a energías.

En el subapartado 4.2.2 de este módulo, se ve que el diagrama de la figura 9 corresponde a un tipo de proceso que se conoce como de Rankine.

Una vez que hemos visto cómo se representan los procesos, veremos los procesos en sí. En concreto, veremos los procesos isotermos, isócoros, isóbaros y adiabáticos.

2.3.2. Proceso isotermo

La evolución de un sistema termodinámico a temperatura constante se conoce como proceso isotermo. Por ejemplo, la expansión o la compresión de un gas se pueden producir sin variación de la temperatura.

Correspondería a los procesos que siguen líneas horizontales en la figura 7 (procesos del 1 al 7, por ejemplo).

La expansión isoterma de un gas ideal se puede llevar a cabo colocando el gas en contacto térmico con otro sistema de capacidad calorífica muy grande (podéis ver el subapartado 1.4.1) y a la misma temperatura que el gas. Este sistema se conoce como foco caliente. De esta manera, el calor se transfiere muy lentamente, lo que permite que el gas se expanda y realice un trabajo, a temperatura constante.

2.3.3. Proceso isócoro

Un proceso isócoro es un proceso que se realiza a volumen constante. En consecuencia, como no hay variación de volumen, el incremento de volumen ΔV es cero ($\Delta V = 0$). Recordad del módulo de cinemática y dinámica que, para que se realice un trabajo, es necesario que se efectúe un desplazamiento y, si no varía el volumen, no hay desplazamiento neto y, en consecuencia, no hay trabajo. Por lo tanto, en un proceso isócoro, el trabajo que realiza el gas es cero ($W = 0$).

Sería el caso, por ejemplo, de un recipiente de paredes gruesas que contiene un gas determinado, al que se le suministra calor: la temperatura y la presión internas aumentan, pero el volumen se mantiene igual. En un proceso que se

efectúa a volumen constante sin que haya ningún desplazamiento, el trabajo realizado por el sistema es cero, es decir, en un proceso isócoro no hay trabajo realizado por el sistema.

2.3.4. Proceso isóbaro

Si la presión no cambia durante un proceso, se dice que éste es isóbaro. Un ejemplo de proceso isóbaro es la ebullición del agua en un recipiente abierto. Como el contenedor está abierto, el proceso se efectúa a presión atmosférica constante. En el punto de ebullición, la temperatura del agua no aumenta con la adición de calor y, en lugar de esto, se produce un cambio de fase de agua a vapor (podéis ver el subapartado 1.4.2). En la figura 7, correspondería a las líneas verticales (1 al 2, 3 al 4, 5 al 6, 6 al 7).

2.3.5. Proceso adiabático

Un proceso adiabático o isoentrópico es aquel en el que el sistema, generalmente un fluido que realiza trabajo, no intercambia calor con su entorno.

El término adiabático hace referencia a elementos que impiden la transferencia de calor con el entorno. En climatización, por ejemplo, los procesos de aporte de vapor de agua (humectación) son adiabáticos, ya que no hay transferencia de calor, aunque se consiga variar la temperatura del aire a partir de su humedad relativa.

Y llegados a este punto, ya estamos en condiciones de enunciar las leyes de la termodinámica.

2.4. Ley cero de la termodinámica

Fijaos en cómo la termodinámica centra la atención en el estudio del interior de los sistemas físicos y en los intercambios de energía en forma de calor que se producen entre un sistema y otro.

El concepto esencial es, por lo tanto, el estudio de los sistemas termodinámicos como un conjunto de materia que se puede aislar, que coexiste en un entorno y que puede intercambiar energía o no. Recordad que el estado del sistema se puede definir por unas variables medibles, como la presión (P), el volumen (V) y la temperatura (T), y que se denominan variables de estado (podéis ver el subapartado 2.1). Hemos visto que estas propiedades sólo se pueden definir cuando el sistema está en equilibrio termodinámico (podéis ver el subapartado 2.2).

Se dice que dos sistemas están en equilibrio térmico si cada uno está individualmente en equilibrio y, si están aislados del exterior, cuando se ponen en contacto a través de una frontera y no experimentan ningún cambio en sus estados.

La experiencia nos enseña que dos sistemas están en equilibrio térmico a través de un único valor, que es su temperatura T. Así, por lo tanto, dos sistemas estarán en equilibrio térmico cuando tengan la misma temperatura.

La ley cero de la termodinámica nos dice que si tenemos dos cuerpos denominados A y B, con diferente temperatura, y los ponemos en contacto, en un tiempo determinado t alcanzarán la misma temperatura, es decir, ambos tendrán la misma temperatura. Si después un tercer cuerpo, que denominaremos C, se pone en contacto con A y B, también alcanzará la misma temperatura y, por lo tanto, A, B y C tendrán la misma temperatura mientas estén en contacto. Y, por lo tanto, estarán en equilibrio.

La denominada ley cero de la termodinámica recibe este nombre porque fue enunciada cuando ya existían la primera y la segunda leyes de la termodinámica. Fijaos en que la ley cero surge del sentido común y no se puede definir a partir de otras definiciones o leyes. Lo que dice es que si dos sistemas están en equilibrio térmico con un tercer sistema, entonces también están en equilibrio térmico entre sí.

Para entender el concepto de equilibrio térmico podemos considerar dos bloques de cobre de la misma geometría y peso, aislados de los alrededores, pero en contacto entre sí. Uno de los bloques está más caliente que el otro y, por lo tanto, su temperatura, su resistencia eléctrica y su volumen son mayores. Al entrar en contacto los dos bloques (que están aislados de sus alrededores) se produce un intercambio de energía en forma de calor, que se puede observar por el decrecimiento de temperatura, volumen y resistencia eléctrica del bloque más caliente. Al mismo tiempo se produce un aumento de las mismas propiedades en el bloque frío. Cuando todos los cambios observables cesen, esta interacción térmica o de calor ha concluido: se dice que ambos bloques han alcanzado el equilibrio térmico.

En otras palabras, si se tienen dos sistemas con diferente temperatura y en equilibrio térmico, cuando estos dos sistemas se mezclan, el sistema que se encontraba a mayor temperatura cederá calor a aquel cuya temperatura era menor. Por otro lado, el que se encontraba a menor temperatura absorberá el calor necesario hasta llegar a una temperatura final de equilibrio térmico. Esta temperatura final estará siempre entre las temperaturas de los sistemas que se mezclan.

Por ejemplo, cuando se añade leche fría al café, el café con leche resultante no está tan caliente como el café, ni tan frío como la leche. Se obtiene así una situación de equilibrio térmico en la que el café, que tenía una temperatura mayor, cederá calor y la leche, con una temperatura más baja, absorberá el calor que cede el café hasta que uno y otra lleguen a una temperatura final de equilibrio.

Ejemplo 2.1

Se mezclan 150 kg de una sustancia A de calor específico 5.000 J/kg °C a 60 °C con 100 kg de otra sustancia B de calor específico 0,88 cal/g °C a 60 °F. Calculad la temperatura final de la muestra una vez que se haya llegado al equilibrio. Podéis suponer que la mezcla es totalmente homogénea y que no hay intercambios de energía con el exterior ni calor generado como consecuencia del proceso, ni calor perdido hacia el exterior.

Solución

Para resolver este problema, debemos comenzar fijándonos en que mezclamos dos sustancias: la sustancia A con la sustancia B. Cada una tiene una temperatura diferente. ¿Cómo resolveremos el problema? En primer lugar, observad que las sustancias no sólo están a diferentes temperaturas, sino que están a distinta escala. Por lo tanto, deberemos pasar ambas temperaturas a la temperatura de medida en el Sistema Internacional, es decir, a kelvin (K).

La sustancia A está a 60 °C y la sustancia B a 60 °F. La escala de medida de la temperatura es diferente para cada una de las temperaturas. Por lo tanto, pasaremos ambas temperaturas a la escala absoluta, es decir, a la escala Kelvin (K).

Para pasar la temperatura expresada en la escala Celsius (°C) a K, aplicaremos la fórmula (1).

Matemáticamente:

$$T\text{ (K)} = T\text{ (°C)} + 273{,}15 \tag{23}$$

$$T_A = 60 + 273{,}15 = 333{,}15\text{ K} \tag{24}$$

Análogamente, la temperatura B, expresada en °F, la expresaremos en °C aplicándole la ecuación (4) y, a continuación, aplicándole de nuevo la ecuación (1), la pasaremos a la escala absoluta (K):

$$T\text{ (°C)} = \frac{T\text{ (°F)} - 32}{1{,}8} \tag{25}$$

$$T_B\text{ (°C)} = \frac{60-32}{1{,}8} = \frac{28}{1{,}8} = 15{,}55\text{ °C} \tag{26}$$

$$T(K) = T(\text{°C}) + 273{,}15 \tag{27}$$

$$T_B = 15{,}55 + 273{,}15 = 282{,}56\text{ K} \tag{28}$$

Si observamos las unidades de medida para el calor específico de las sustancias A y B, se puede ver que un calor específico c_e está expresado en las unidades del Sistema Internacional de medida, mientras que la otra está expresada en calorías. Por lo tanto, deberemos pasar esta última al Sistema Internacional de medida, J/kg · K, teniendo en cuenta la relación entre julios y calorías: 1 cal = 4,184 J.

$$C_{e,B} = 0{,}88\ \frac{\text{cal}}{\text{g}\cdot\text{K}} = \frac{0{,}88\text{ cal}\cdot 4{,}184\ \frac{\text{J}}{\text{cal}}\cdot 1.000\ \frac{\text{g}}{\text{Kg}}}{1\,\text{g}\cdot\text{K}} = 3.681{,}92\,\frac{\text{J}}{\text{Kg}\cdot\text{K}} \tag{29}$$

Ahora que ya lo tenemos todo en las mismas unidades, podemos continuar. Si tenemos dos sustancias a diferentes temperaturas, el equilibrio térmico se conseguirá cuando el calor que desprende la que está a mayor temperatura se iguale al calor que absorbe la sustancia que se encuentra a menor temperatura, es decir, cuando el calor cedido sea igual al calor absorbido.

Para llegar al equilibrio termodinámico, es decir, a una temperatura final de equilibrio, el calor que cede la sustancia que está a más una temperatura (sustancia A), Q_A, debe ser igual al calor absorbido por la sustancia que tiene una temperatura menor (sustancia B), Q_B.

$$Q_A = Q_B \tag{30}$$

Este calor absorbido o cedido está determinado por la expresión (6):

$$C_e = \frac{Q}{m\Delta T} \tag{31}$$

Que, al aislar el calor, se convierte en:

$$Q = mc_e \Delta T \quad (32)$$

Si aplicamos que el calor cedido por A es igual al absorbido por B, donde T_f es la temperatura final de equilibrio que alcanzará la mezcla, y que será mayor que T_B y menor que T_A, tendremos:

$$Q_A = Q_B \quad (33)$$

$$m_A \cdot c_{e,A} \cdot (T_A - T_f) = m_B \cdot c_{e,B} \cdot (T_f - T_B) \quad (34)$$

Donde m_A es la masa de A, $c_{e,A}$ es el calor específico de A y T_A es la temperatura inicial de A. Los elementos con subíndice B indicarán lo mismo para la masa B. T_f es la temperatura final que alcanzará el sistema. Si sustituimos los valores de las masas, los calores específicos y las temperaturas, se obtiene una ecuación cuya única incógnita es, precisamente, la temperatura final de equilibrio (T_f) de la mezcla de la sustancia A y la sustancia B:

$$150 \cdot 5.000 \cdot (333{,}15 - T_f) = 100 \cdot 3681{,}92 \cdot (T_f - 288{,}56) \quad (35)$$

Calculemos la temperatura final:

$$T_f = 318{,}59 \text{ K} \quad (36)$$

La temperatura final de equilibrio de la mezcla es, por lo tanto, 45,44 °C (318,59 K). Fijaos en cómo esta temperatura se halla dentro del intervalo comprendido entre la temperatura más alta y la más baja de las sustancias que constituyen la mezcla.

2.5. Primer principio de la termodinámica

El primer principio de la termodinámica es una ley de conservación de la energía y, a su vez, una definición precisa del concepto de calor.

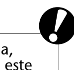
El **primer principio de la termodinámica**, o ley de conservación de la energía, afirma que, como la energía no se crea ni se destruye, la cantidad de energía que se transfiere a un sistema en forma de calor (*Q*) más la cantidad de energía transferida al sistema en forma de trabajo (*W*) debe ser igual al aumento de energía interna (*U*) del sistema.

Matemáticamente, el primer principio de la termodinámica se puede enunciar de la manera siguiente:

$$\Delta Q + \Delta W = \Delta U \quad (37)$$

Es decir, en todo sistema aislado, la energía interna se conserva.

El primer principio de la termodinámica es la formalización del principio de conservación de la energía, según el cual la energía no se crea ni se destruye, sólo se transforma.



Para la definición de energía interna, podéis ver el subapartado 2.1.1 de este módulo didáctico.

Esta definición es compatible con lo que ya hemos visto: que el calor y el trabajo son mecanismos de intercambio de energía entre los sistemas (podéis ver por ejemplo el subapartado 1.4.3). El primer principio de la termodinámica identifica el calor (*Q*) como una forma de energía, que se puede convertir en

trabajo mecánico y almacenarse. Por lo tanto, desde el primer principio de la termodinámica, el calor, al igual que el trabajo, es una energía en tránsito, es decir, un proceso de intercambio de energía y puede causar los mismos cambios en un cuerpo que el trabajo.

La energía mecánica se puede convertir en calor mediante la fricción. Además, el trabajo mecánico necesario para producir una caloría se conoce como el equivalente mecánico del calor. Según el primer principio, o principio de conservación de la energía, todo el trabajo mecánico realizado para producir calor por fricción aparece en forma de energía en los objetos sobre los que se realiza el trabajo. Por ejemplo, cuando se calienta agua en un recipiente cerrado al hacer girar unas ruedas de paletas, el aumento de nivel energético del agua es proporcional al trabajo realizado para mover las ruedas de paletas.

Cualquier máquina necesita cierta cantidad de energía para producir trabajo. Es imposible que una máquina realice un trabajo sin ningún aporte de energía. Cuando el calor se convierte en energía mecánica, como en un motor de combustión interna, la ley de conservación de la energía también es válida. Por otro lado, siempre se pierde o disipa energía en forma de calor porque ningún motor tiene una eficiencia perfecta.

Pérdida de energía

Cuando decimos que se pierde energía, no es que se pierda, sino que se transforma en algún tipo de energía que no podemos aprovechar.

2.6. Segundo principio de la termodinámica. Entropía

Hemos visto que la primera ley de la termodinámica es una expresión de la ley de la conservación de la energía. La aplicación de la primera ley en diferentes sistemas nos permite realizar predicciones que después se pueden comprobar experimentalmente. Por otro lado, en ningún momento se dedujo la primera ley de la termodinámica, sino que se presentó como una consecuencia de las observaciones experimentales.

Uno de los aspectos relevantes de la termodinámica es que se basa en principios axiomáticos, es decir, que no se pueden demostrar, pero su validez está ampliamente sustentada por la experiencia.

El primer principio de la termodinámica (apartado 2.5) es la formalización del principio de conservación de la energía, según el cual la energía no se crea ni se destruye, sino que se transforma. Según esto, en cualquier proceso que se da en la naturaleza, el balance de energía es nulo. Esta descripción de la naturaleza es cierta, pero incompleta.

En efecto, el primer principio no nos dice nada del sentido en el que pueden ocurrir los procesos a la naturaleza de manera espontánea. Un ejemplo de esto es cuando ponemos en contacto dos cuerpos con diferente temperatura: se establece un flujo de calor desde el cuerpo con temperatura más alta hasta el de temperatura más baja. Según el primer principio, el calor cedido por el cuerpo caliente debe ser igual al absorbido por el cuerpo frío, pero no explica por qué el flujo de calor

no se dirige desde el cuerpo frío hasta el caliente, que es un caso que no iría en contra del principio de conservación de la energía.

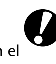
En la caída de un cuerpo desde cierta altura hasta el suelo se produce la transformación de la energía potencial en energía térmica como consecuencia del impacto. El primer principio de la termodinámica no niega la posibilidad de transformación de la energía térmica en potencial y que el cuerpo se eleve hasta su altura inicial. Por otro lado, todos sabemos que esta transformación no se dará espontáneamente, es decir, sin ninguna acción exterior.

Otro ejemplo sería la reacción exotérmica que se produce al combinar un combustible y un comburente, que desprende energía y productos de la combustión. Esta reacción se da igualmente en un único sentido. Nunca se ha visto que productos de la combustión reaccionen al aportarles energía y devuelvan el combustible y el comburente originales.

Combustible y comburente

En una reacción de combustión típica el combustible es la sustancia que se quema y libera energía, gracias a su gran poder calorífico, mientras que el comburente es una sustancia que favorece la combustión al oxidar el combustible. Por ejemplo, en una reacción con petróleo, el combustible sería el petróleo y el oxígeno (por ejemplo de la atmósfera) sería el comburente.

La observación de la naturaleza nos indica la existencia de una limitación de los procesos que tienen lugar en ella espontáneamente. Esta limitación del sentido en el que se dan los procesos en la naturaleza, que describe el primer principio, impone la necesidad de establecer una ley general que determine la espontaneidad de los procesos, es decir, que tenga en cuenta cuál es el sentido en que se producen espontáneamente los procesos. Esta ley es el segundo principio de la termodinámica.



Podéis ver el concepto de *entropía* en el subapartado 2.1.1 de este módulo didáctico.

El **segundo principio de la termodinámica** afirma que la entropía *S*, es decir, el desorden de un sistema aislado, nunca puede decrecer. Por lo tanto, cuando un sistema aislado alcanza una configuración de máxima entropía, ya no puede experimentar cambios, puesto que ha alcanzado el equilibrio.

Matemáticamente:

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T} \qquad (38)$$

Es decir, la variación de entropía es igual a la variación de calor entre la temperatura a la que se encuentra el sistema. La entropía *S* es una función de estado del sistema. Tiene un valor único para cada estado de equilibrio, independientemente de cómo se llegó a dicho estado. Según la ecuación (38), la entropía está relacionada con magnitudes que son medibles, como la variación de calor *Q* y la temperatura *T*.

Parece que la naturaleza prefiere el desorden y el caos. Con el segundo principio se puede demostrar que, si no se realiza trabajo, es imposible transferir calor desde una región de temperatura más baja a otra con temperatura más alta.

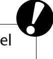
Feynmann decía que la entropía siempre crece porque existen más modos de tener las cosas desordenadas que de tenerlas ordenadas, por lo que es más probable un estado con más entropía.

Un elemento muy importante que impone el segundo principio de la termodinámica a la espontaneidad de ciertos procesos es la transformación de calor en trabajo. La transformación de trabajo en calor se realiza de manera natural, por ejemplo en la fricción. Sin embargo, el caso contrario es más difícil de obtener. De hecho, los motores térmicos son un invento reciente, del siglo XVIII. Éste y otros ejemplos nos indican que existe una diferencia esencial entre el calor y las otras forma de energía (trabajo, química, nuclear, etc.), ya que todas éstas se pueden transformar íntegramente en calor, mientas que la transformación inversa no se realiza completamente.

Richard Phillips Feynman

Físico norteamericano (Nueva York, 1918-Los Ángeles, 1988), considerado uno de los más importantes del siglo XX. Obtuvo el Premio Nobel de Física en 1965 por su trabajo en electrodinámica cuántica, compartido con el físico norteamericano Julian Schwinger y el físico japonés Sin-Itiro Tomonaga. A lo largo de su vida, recibió numerosos premios y se le considera una de las figuras pioneras de la nanotecnología y una de las primeras personas en proponer la realización futura de los ordenadores cuánticos. También se le conoce por su trabajo como docente y sus libros divulgativos.

La segunda ley de la termodinámica proporciona también una definición precisa de una propiedad denominada entropía: ésta se puede considerar como una medida de lo próximo que se halla un sistema del equilibrio. También se puede considerar como una medida del desorden del sistema, como ya habéis visto.



Podéis ver el concepto de *entropía* en el subapartado 2.1.1 de este módulo didáctico.

2.7. ¿Qué hemos aprendido?

En este apartado hemos aprendido:

- la definición de sistema termodinámico, su clasificación y las partes que lo forman;
- los diferentes procesos que puede experimentar un sistema termodinámico, como los procesos a presión, el volumen o la temperatura constante o los procesos adiabáticos (sin transferencia de calor);
- cómo se pueden representar, en un diagrama *T-S*, los procesos experimentados por un sistema termodinámico, y
- las leyes básicas de la termodinámica.

Una vez vistos teóricamente los diferentes conceptos termodinámicos relacionados con la energía, pasaremos a la aplicación de estos conceptos en el sistema energético actual. Comenzaremos con una visión global del funcionamiento del sistema energético.

3. Acceso a la energía

Para empezar a introducirnos en el mundo de la energía, en primer lugar debéis echar un vistazo al estado de la cuestión en nuestra sociedad.

El objetivo de este apartado es doble. En una primera parte, queremos daros a conocer algunos datos y valores del consumo energético actual, a escala mundial y también individual. En una segunda parte, concretaremos el funcionamiento del mercado eléctrico español y los diferentes agentes que lo forman. Estudiaremos el sistema eléctrico español porque es una isla energética, lo que permitirá entender mejor los distintos procesos implicados.

¿Qué aprenderemos?

- Veremos la importancia del uso de la energía en la sociedad actual y los usos a los que la destinamos;
- aprenderemos el concepto de energía primaria y valoraremos este término en el caso de España;
- analizaremos cómo es nuestro consumo de energía en el hogar;
- veremos la importancia actual de la energía eléctrica;
- describiremos los diferentes impactos ambientales, sociales y económicos que están ligados al consumo de energía;
- conoceremos cómo funciona y qué agentes interactúan en el mercado eléctrico.

¿Qué supondremos?

Supondremos que conocéis las equivalencias entre las principales unidades de energía y potencia, como kWh, MW, etc., y que comprendéis las magnitudes del sistema energético global y el consumo de energía en nuestra sociedad. También supondremos que tenéis muy clara la diferencia entre potencia y energía.

3.1. Datos de la energía

Cada mes, cada dos meses o cada trimestre nos llegan a casa las facturas de los suministros. Normalmente, lo único que hacemos es mirar si la cifra que nos toca pagar se parece a la que aparecía en la factura anterior y, si más o menos se parecen, la archivamos y nos olvidamos de ella. No obstante, es importante que conozcamos qué hay realmente detrás de cada unidad de energía que consumimos y que podamos valorar si nos encontramos en un término medio de consumo, por arriba o por abajo.

El objetivo de este apartado es, pues, dar una pincelada a algunos aspectos clave asociados al consumo de energía actual, y comenzaremos a escala mundial para llegar al análisis de nuestro hogar.

3.1.1. Evolución y estado actual del consumo energético

La humanidad ha evolucionado mucho desde sus inicios y cada día parece que la velocidad de cambio aumenta. Sólo necesitamos compararnos con nuestros abuelos. Cuando ellos tenían nuestra edad no tenían ni móvil, ni reproductor portátil de música, ni ordenador, etc. Todos estos aparatos, que ahora nos resultan imprescindibles para llevar a cabo nuestro día a día, consumen energía y esto, evidentemente, se nota a escala mundial.

Así, como se puede ver en el gráfico ilustrativo de la figura 8, el consumo energético ha evolucionado exponencialmente con los años, desde el hombre primitivo del tipo cazador-recolector hasta el actual "hombre tecnológico". Fijaos en cómo consumimos la energía actualmente y la evolución de cada una de las partes del gráfico.

1) **La alimentación**. Es el aspecto básico e imprescindible para nuestra supervivencia, y podemos ver que crece, pero no demasiado, ya que las calorías ingeridas en nuestra dieta, las que necesitamos para poder crecer y subsistir, continúan siendo las mismas. Por otro lado, es cierto que comemos más carne que nuestros antepasados y que tenemos muchos más excendentes de alimentos que se estropean o simplemente no se consumen, hecho que en términos energéticos representa un incremento de energía. Sin embargo, no es en este aspecto en el que hemos realizado el mayor salto cuantitativo; el crecimiento se ha notado mucho más en los otros tres aspectos.

2) **El consumo doméstico y en servicios.** En nuestros hogares y lugares de trabajo, la tecnología que nos rodea supone un consumo de energía, que si bien individualmente no parece demasiado, en su conjunto es notable. También hay que tener en cuenta, sobre todo, la climatización de los edificios (la calefacción y el aire acondicionado), que representa, tal y como veremos más adelante, en el apartado 3.1.3, el consumo mayoritario de nuestros edificios.

3) **El consumo industrial y agrícola.** La tecnificación del campo, con vehículos, maquinaria de recolección, sistemas de regadío, etc., implica que actualmente los cultivos tengan asociado un consumo energético mucho mayor. Las industrias, cada vez más automatizadas y con menos trabajo manual o humano, también han experimentado un incremento del consumo: automatización de procesos, almacenes completamente robotizados, etc.

4) **El transporte**. Sin duda, es uno de los aspectos clave de nuestro consumo actual y sería necesario actualizar el gráfico con valores aún más recientes. Un

ejemplo lo tenemos en las compañías de vuelo de bajo coste, que han permitido que pasemos un fin de semana, por ejemplo, en Londres. Además, para las vacaciones de verano elegimos destinos que eran completamente exóticos hace cincuenta años. Y, finalmente, los desplazamientos diarios para ir de casa al trabajo, que en muchos casos representan una gran inversión de tiempo y un consumo de combustible notable a final de año.

Figura 8. Evolución del consumo energético por persona y por tipo de uso

Fuente: Adaptado de *El Correo de la UNESCO*

Con esta revisión de la evolución del consumo energético podemos ver que vivimos en una era en la que el uso intensivo de la energía en nuestro día a día es un aspecto clave, y eso es muy bueno por una parte y malo por otra. Tiene ventajas significativas, sobre todo de mejora de la calidad de vida, pero también tiene grandes inconvenientes, como la dependencia que tenemos de la energía y los costes que ésta implica.

Nuestra dependencia energética es doble:

1) Por un lado, observamos que no podemos realizar nuestro trabajo ni nuestro día a día si falla, por ejemplo, el suministro eléctrico. Basta recordar el episodio de julio del 2007, cuando algunas zonas de Barcelona se quedaron sin suministro eléctrico durante tres días y hubo gente que ni siquiera pudo cocinar.

2) Por otro lado, tenemos una dependencia exterior de la energía, sobre todo de petróleo, gas y combustible nuclear, que no son recursos nacionales, sino que provienen de otros países para nuestro consumo. Y en este sentido encontramos numerosos casos de conflictos bélicos y de luchas por el dominio

geoestratégico de los recursos a lo largo de la historia. Este aspecto se analizará con más detalle en el siguiente apartado, dedicado al consumo de energía primaria.

A modo de conclusión sobre la evolución del consumo energético, debemos hacer una puntualización relacionada con el reparto de este consumo a escala mundial. Los países del sur, en fase de desarrollo y con modelos sociales más primitivos (no están en la última columna del gráfico de la figura 8), consumen mucha menos energía en su día a día y siempre utilizan fuentes más locales. Algunos casos extremos los encontramos, por ejemplo, en los Andes, en América del Sur, donde hay zonas en las que el único recurso energético son los excrementos secos del ganado que utilizan a modo de leña para cocinar, iluminarse y calentarse. A escala mundial existen, pues, desigualdades muy notables.

Globalmente, se dice que un 80% de la población mundial consume el 20% de los recursos, mientras que el otro 20% de la población consume el 80% de los recursos.

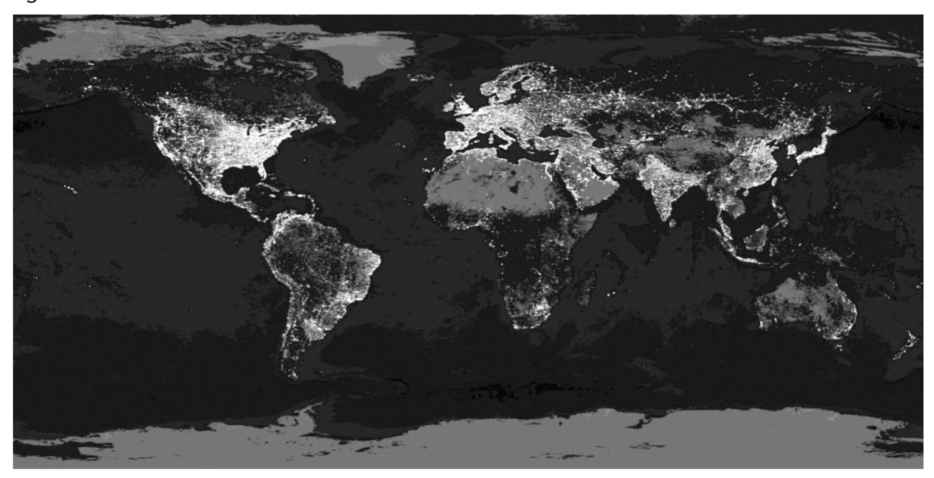
Gráficamente, eso se muestra en la figura 9.

Figura 9. Representación gráfica del reparto del consumo en el mundo



Una imagen que sin duda hace reflexionar y nos transmite esta disparidad social a escala mundial es el montaje de la fotografía del mundo de noche que la NASA publicó en su web y que os mostramos en la figura 10. La intensidad luminosa de cada zona del globo terráqueo, aunque no se corresponda directamente con el consumo energético, nos da una idea muy acertada del estado de desarrollo de las diferentes regiones del mundo, pese a que a la explicación de la fotografía se relacione más con la densidad de población. Las zonas con más intensidad luminosa son Estados Unidos, Europa y Japón, y las que menos corresponden a África, China y el Amazonas.

Figura 10. El mundo de noche



Fuente: *Astronomy picture of the day* (http://antwrp.gsfc.nasa.gov/)

3.1.2. Tipos de energía y concepto de energía primaria

Para analizar con más detalle cómo consumimos la energía, comenzaremos definiendo el concepto de energía primaria.

Desde la energía presente en la naturaleza en diferentes formas (temperatura, movimiento, etc.) hasta la energía que necesitamos realmente para realizar ciertos trabajos, existen diferentes tipos de energía, como se muestra en la figura 11. Éstos son:

- la energía libre: es la energía presente en la naturaleza, a modo de temperatura, energía potencial, movimiento, etc.;

La energía potencial se explica en el módulo "Mecánica" y la temperatura se explica en el subapartado 1.3 de este módulo.

- la energía primaria: es la energía libre que puede ser captada y aprovechada por el hombre. Los principales tipos de energía primaria, y que analizaremos con más detalle en los apartados 4, 5 y 6, son:

  a) los combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural),
  b) la energía nuclear, y
  c) las energías renovables (solar, eólica, biomasa, etc.).

- la energía secundaria: una vez tenemos la energía primaria, la podemos transformar, una o más veces, en otras formas de energía, como por ejemplo en una central térmica, que transforma la energía del combustible en energía eléctrica, como veremos más adelante en el apartado 4.2;

- la energía final: es la energía que realmente consumimos, es decir, la que pagamos con nuestras facturas de gas y electricidad, y

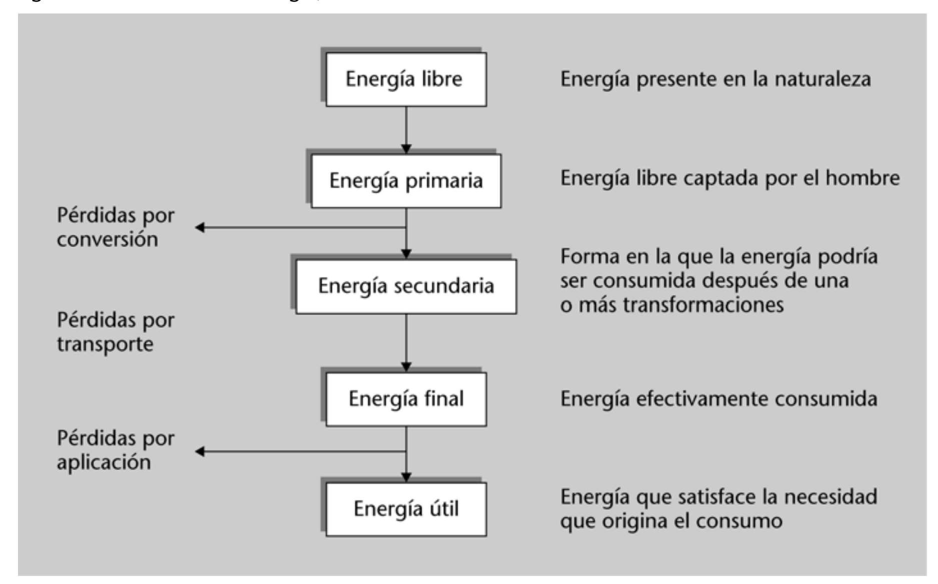
- la energía útil: es aquella que realmente necesitamos, la que se utiliza para satisfacer la necesidad que origina el consumo, la que aprovechamos. La diferencia entre la energía final y la energía útil será el rendimiento del aparato que utilizamos.

Para explicarlo mejor, en la figura 11 tenéis el proceso que sigue la energía desde el origen, en la naturaleza (a modo de energía libre), hasta el destino, el consumo final (la energía útil). En ella se puede apreciar que el concepto de energía primaria es el más global y el que incluye todas las pérdidas originadas en el sistema energético (pérdidas por conversión, por transporte y por aplicación).

Transformación de la energía

Las transformaciones, desde la energía libre hasta la energía útil, se producen según el primer principio de la termodinámica, pero parte de la energía se pierde en cada transformación, principalmente en forma de calor.

Figura 11. Proceso de la energía, de la naturaleza al consumo



Así, el concepto de energía primaria es muy útil para elaborar las estadísticas energéticas, ya que incluye **todo** el consumo energético asociado al país (si sólo miramos el mercado eléctrico, nos faltarán los combustibles de los vehículos; si miramos los combustibles, nos faltará la energía necesaria para refinarlos, etc.). La energía primaria es, pues, un término global que nos ayuda a valorar la energía que realmente necesitamos para seguir con nuestro modelo social.

3.1.3. Consumo de energía primaria en España

Para analizar con más detalle cómo consumimos la energía, hemos creído conveniente desarrollar completamente el caso del consumo energético en España. La geografía de la península Ibérica provoca que, energéticamente, sobre todo en cuanto a la electricidad, sea casi una isla, que funciona de manera autónoma e independiente, ya que las conexiones que tenemos con el exterior (Europa, Portugal y Marruecos) son muy poco significativas respecto al consumo energético total. Los países centroeuropeos, en cambio, tienen un tejido eléctrico que les permite comportarse como una red en la que las fronteras políticas son casi invisibles. Así, en Europa habrá un consumo energético mucho más uniforme entre países que en España, que en este sentido es más individual.

Consumo de energía

En el año 2008, los intercambios de electricidad de España con Europa fueron de 6.214 GWh, un 2,35% del total de los 263.530 GWh de energía consumida.

(Fuente: *El sistema eléctrico español 2008*, Red Eléctrica de España)

¿Y cómo es el consumo de energía primaria en España? Para analizarlo, hemos accedido al informe que elabora el Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino denominado *Perfil ambiental de España 2008* (el más reciente en el mo-

mento de la redacción y cuyo contenido completo podéis consultar en la web del Ministerio). Este informe dispone de diferentes capítulos y hay uno dedicado exclusivamente a la energía, en el que podemos encontrar el gráfico de la evolución del consumo de energía primaria que se muestra en la figura 12.

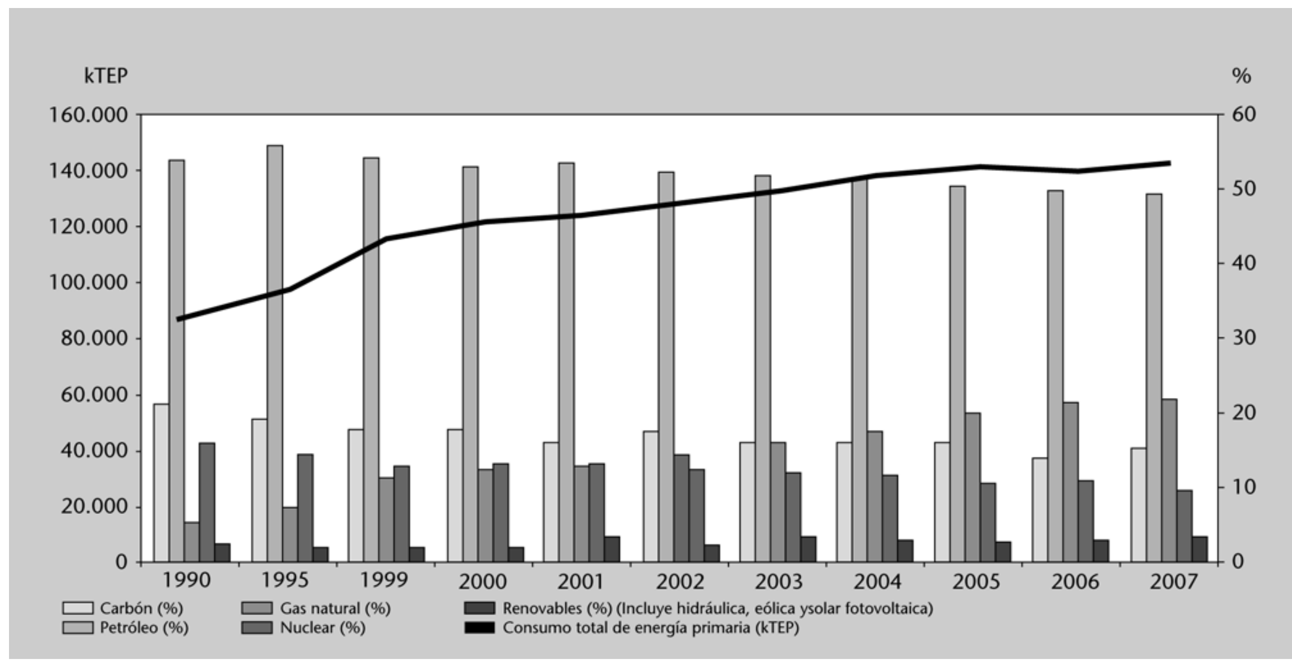
En este gráfico vemos, en primer lugar, la tendencia creciente de consumo de energía primaria, que desde el año 1990 al 2007 se ha incrementado aproximadamente un 55%. En segundo lugar, apreciamos en él los porcentajes de los diferentes tipos de fuentes: las que descienden son el petróleo, el carbón y la nuclear; las energías renovables se mantienen aproximadamente y la única fuente que muestra una tendencia creciente es el gas natural.

Entre estas fuentes, sólo las renovables y parte del carbón son locales, por lo que **más del 80% de la energía primaria consumida proviene de fuera del territorio estatal**. A este aspecto nos referíamos cuando hablábamos de la dependencia del sistema energético en el apartado 3.1.1, y esta dependencia nos hace muy vulnerables, como sociedad, frente a países que nos suministran los recursos energéticos.

Recursos energéticos

El petróleo proviene principalmente de los Emiratos Árabes, el gas proviene de Argelia (en el caso de España) y el combustible nuclear proviene del Congo y de otros países africanos.

Figura 12. Evolución del consumo de energía primaria



Fuente: Datos extraídos de MIT y C

Para acabar con los indicadores del sistema energético español, es importante hablar de la **intensidad de la energía primaria**, un concepto del que quizá ya habéis oído hablar. Este indicador nace de la necesidad de valorar el incremento en el consumo de la energía primaria de un país, asociado a su producto interior bruto (PIB) anual. De esta manera, si un país está en vías de desarrollo en un momento de crecimiento económico, lo más probable es que incremente su consumo de energía primaria, pero si este valor lo dividimos por el PIB, obtendremos un valor que nos indica, además, la eficiencia del país para producir una unidad de PIB. El gráfico de la figura 13 muestra la evolución de este indicador. En él podemos ver que España se encuentra por encima de la media

Unidad kTEP

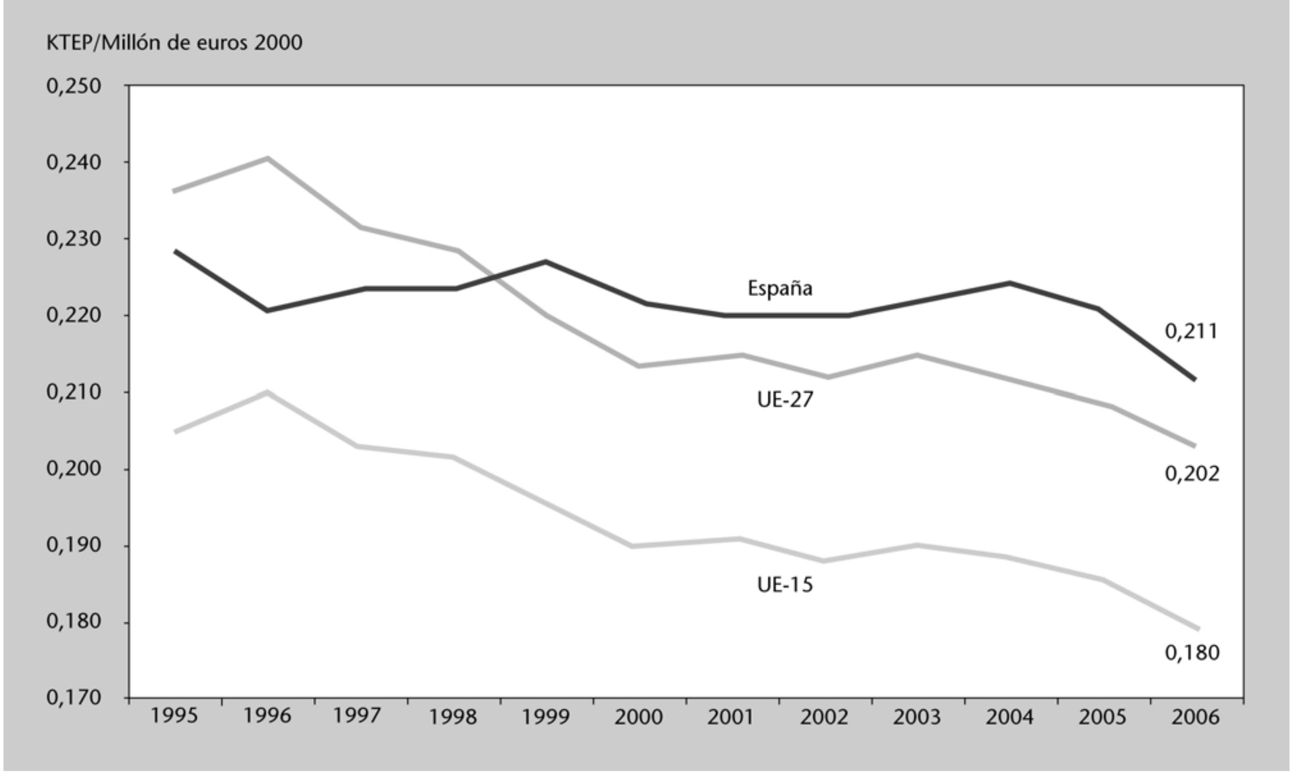
La unidad kTEP es la abreviatura de kilotonelada equivalente de petróleo y es una unidad de energía (1 kTEP equivale a 1.000 TEP o toneladas equivalentes de petróleo), con las equivalencias siguientes:

1 TEP = 41.868.000.000 J (julios) = 11.630 kWh (kilovatios hora)

En inglés, TEP corresponde a TOE (*tonne of oil equivalent*).

europea (es decir, que somos más “ineficientes”) y que, además, la tendencia global, extraída de los últimos años, es más o menos estable.

Figura 13. Evolución de la intensidad de energía primaria



Fuente: Datos extraídos de Eurosat

3.1.4. Consumo de energía en el hogar

Hasta ahora hemos visto la evolución del consumo energético a lo largo de la historia y el consumo de energía primaria en España. Ahora expondremos un ejemplo mucho más palpable y que sentiréis más próximo, como es el consumo energético en el hogar.

Para empezar, es interesante saber cómo gastamos la energía consumida en el hogar, qué usos le damos. Como ejemplo de ciudad mediterránea, en la figura 14 se muestran los porcentajes de uso de energía según la *Guía para el ahorro energético* publicada por el Ayuntamiento de Barcelona. Estos porcentajes pueden variar mucho, sobre todo en función del clima (por ejemplo, en climas más fríos tendremos un mayor consumo de calefacción).

> Los usos que hacemos de la energía en el hogar los repartimos entre las tres fuentes energéticas habituales: electricidad (iluminación y electrodomésticos), gas natural (cocina y calefacción) y energía solar térmica (para el agua caliente).

De estas fuentes energéticas, es interesante fijarse en la repercusión que tiene la iluminación en el total. Actualmente, en un hogar que sea completamente

eléctrico, es un consumo minoritario si se compara con el de los aparatos eléctricos y electrónicos que utilizamos, pero es curioso el hecho de que, por herencia histórica, cuando se produce un corte de suministro todavía decimos que "se ha ido la luz".

Figura 14. Distribución del consumo energético por usos en un casa de Barcelona.

Fuente: Adaptado de *Guía para el ahorro energético.* Ajuntament de Barcelona

A continuación, y para ver qué impacto anual tiene en nuestras casas el consumo de energía, os proponemos realizar una pequeña auditoría energética.

Actividad 3.1. Auditoría energética en casa

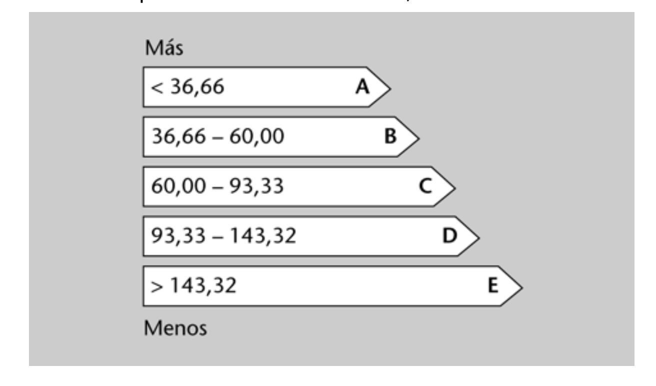
1. Determinad qué fuente energética satisface, en vuestra casa, cada una de las necesidades de la figura 14 (energía eléctrica, gas natural o energías renovables).

2. Tomad las facturas del suministro energético (gas y electricidad) del último año y calculad vuestro consumo anual en kWh.

3. Calculad, a partir de la superficie de vuestro hogar, el consumo energético por metro cuadrado (kWh/m^2 por año), dividiendo el consumo del hogar por la superficie del piso.

4. Con este valor, clasificad vuestra vivienda según la siguiente escala para el consumo energético del hogar:

Clasificación energética del hogar según el actual sistema de certificación energética de edificios de nueva construcción, establecido por el Real Decreto 47/2007, de 19 de enero.



Escala de clasificación

La escala de clasificación se ha obtenido siguiendo el procedimiento establecido en el documento *Escala de Calificación Energética para Edificios de Nueva Construcción* editado por el Ministerio de Vivienda y por el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, para Barcelona (zona climática C2) y para edificios de viviendas. Si cambia la ubicación de la vivienda o el tipo de edificio, la escala ya no es aplicable.

5. Valorad, siguiendo los baremos siguientes, qué tipo de vivienda tenéis:

a) Si obtenéis una clasificación A o B, vuestra vivienda es muy eficiente y habéis realizado una buena gestión de la energía. Seguro que seguís recomendaciones de ahorro y eficiencia energética.

b) Si obtenéis una clasificación C, tenéis un hogar de tipo medio y seguro que tenéis la opción de realizar alguna mejora que os ayude a reducir el consumo energético.

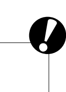
c) Si la clasificación que obtenéis es D o E, se puede decir que, en términos actuales, la vivienda no es eficiente en ahorro y seguramente podéis adoptar medidas que os ayuden a mejorar su comportamiento.

3.1.5. La energía eléctrica

Hasta ahora hemos visto el consumo de energía que hacemos como sociedad, y concretamente en nuestro hogar, así como la energía primaria que consume España. Uno de los tipos de energía que más consumimos es la energía eléctrica, que tiene un papel relevante y cada día mayor. Por ello es importante que conozcáis algunos datos sobre este tipo de energía.

Definición de energía eléctrica

Comencemos pues con una definición de energía eléctrica.



Para más información, podéis ver el módulo "Electrostática" de esta asignatura.

Se denomina **energía eléctrica** a la forma de energía que surge de la existencia de una diferencia de potencial entre dos puntos. Esto permite establecer una corriente eléctrica entre ambos, cuando se los pone en contacto mediante un conductor eléctrico, para obtener de ellos trabajo.

¿Por qué es importante la energía eléctrica?

La gran importancia actual de la energía eléctrica no se debe tanto a su naturaleza como al hecho de que ésta se puede transformar fácilmente, con las tecnologías actuales, en muchas otras formas de energía y de que, por lo tanto, puede satisfacer muchas de las necesidades o demandas que tenemos hoy en día como sociedad.

Precisamente por esta mayor tecnificación de nuestra vida, la energía eléctrica es un elemento clave en nuestro día a día. Por ejemplo, años atrás, cuando la extensión de la red eléctrica no era tan grande como ahora, existían las neveras de gas. Éstas no se enchufaban, sino que funcionaban con una bombona de gas. Hoy en día, en cambio, podríamos afirmar que casi todas las neveras que existen son eléctricas.

A causa, pues, de la importancia actual de este tipo de energía, y el potencial crecimiento tan grande que tiene (con la posible implantación de coches eléctricos), debéis conocer sus principales características.

El diagrama de Sankey

Para ver qué papel tiene la energía eléctrica respecto a la energía primaria (definida en el subapartado 3.1.2) que se consume en España, emplearemos el diagrama de Sankey para la energía en España en el año 2008, que se adjunta en la figura 15.

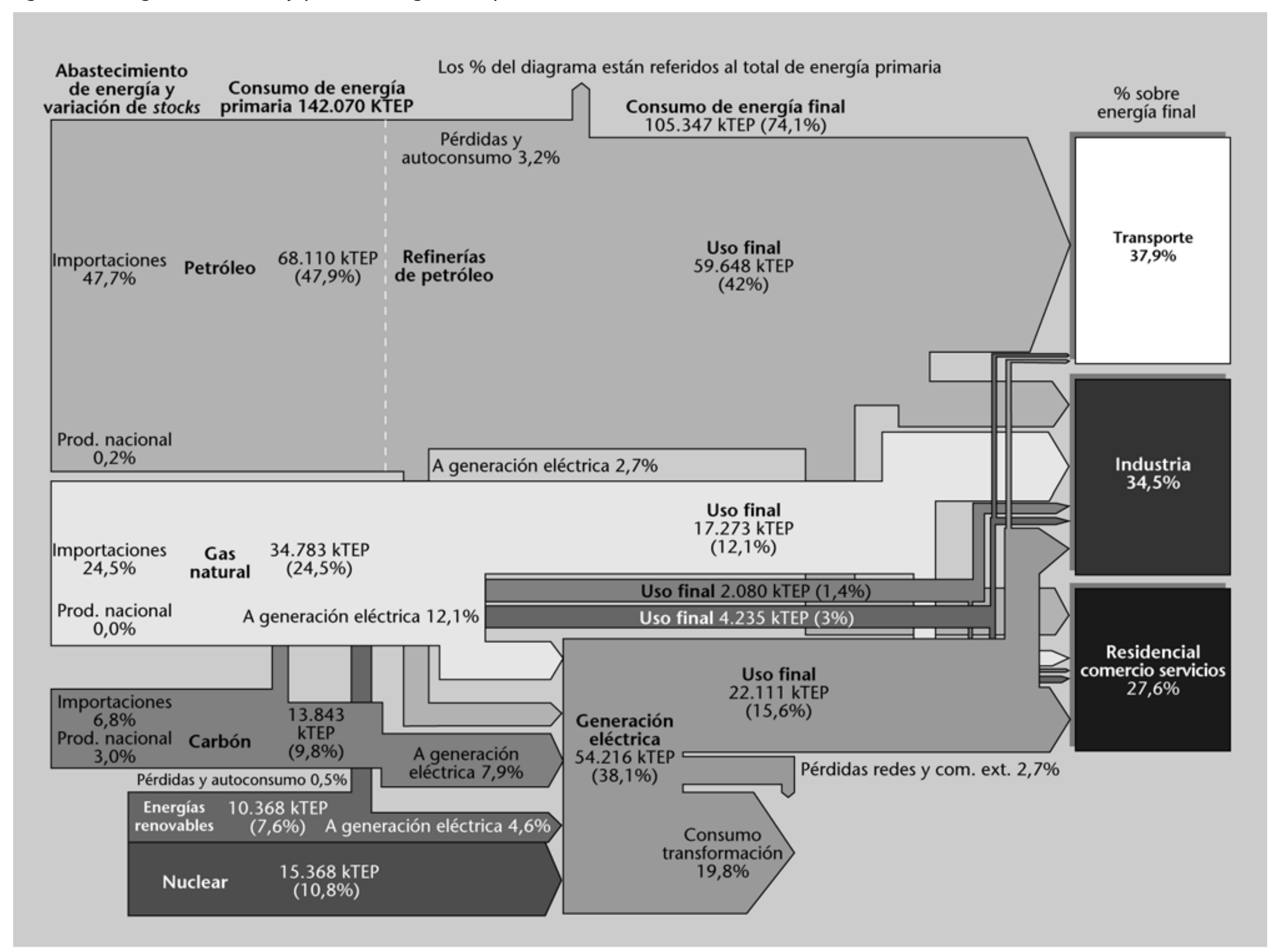
Diagrama de Sankey

Representación gráfica del consumo de energía en un ecosistema natural o artificial, a partir de franjas que representan, según su grosor, la cantidad de energía correspondiente y, según su dirección, el destino final de esta energía.

En este diagrama entramos por la izquierda, donde vemos los diferentes tipos de energía primaria consumida en España. A medida que avanzamos hacia la derecha del diagrama, se producen pérdidas en el sistema (por autoconsumo, por el transporte, por las transformaciones, etc.), en forma de flechas que no llegan al límite de la derecha. Por lo tanto, llegamos a un punto en el que se nos indica el consumo de energía final (la que pagamos en nuestras facturas y que pasa por los contadores). Y totalmente a la derecha tenemos los porcentajes de energía que consumimos para cada aplicación (transporte, industria y la correspondiente a las residencias, el comercio y los servicios).

Así, al observar el diagrama de la figura 15, vemos que la energía eléctrica constituye el 21% del consumo de energía final, ya que la energía eléctrica representa 22.111 kTEP del total de 105.347 kTEP de consumo de energía final.

Figura 15. Diagrama de Sankey para la energía en España en el 2008



Fuente: Adaptado de *La energía en España 2008*. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio

Podemos apreciar también en este diagrama que la energía eléctrica es un tipo de energía secundaria y de energía final, según se ha descrito en la figura 11. Es un tipo de energía secundaria porque se obtiene de la transformación de otro recurso (petróleo, gas, viento, nuclear, etc.) y es un tipo de energía final porque es también una forma que tenemos actualmente de consumir energía para satisfacer la demanda real de energía útil.

Estos dos aspectos de la energía eléctrica son muy importantes y deberemos tenerlos presentes, ya que, en función de la tecnología de generación que empleamos (en la producción de la electricidad en las centrales eléctricas) y del aparato que utilizamos (en nuestro consumo de energía final), podemos llegar a tener unos rendimientos globales, desde la energía primaria a la energía útil, muy bajos.

Veamos ahora, en los siguientes apartados, dos valores del sistema de generación eléctrica que extraemos del diagrama de la figura 3.8: el rendimiento global del sistema de generación eléctrica y el valor de las pérdidas en el transporte de electricidad.

Rendimiento del sistema de generación eléctrica

Existe un concepto clave para conocer el nivel de eficiencia de un sistema: es el *rendimiento*.

El **rendimiento** se calcula como el cociente entre la energía total obtenida, en el sentido de que la aprovechamos, y la energía total suministrada:

$$Rendimiento = \frac{Energía\ obtenida\ (aprovechable)}{Energía\ total\ \ subministrada} \times 100 \qquad (39)$$

La expresión se multiplica por 100 porque el resultado se suele dar en tanto por ciento.

Para saber cuál es el rendimiento de la generación eléctrica, es decir, el rendimiento de la transformación de la energía secundaria, vemos, a partir del mismo diagrama de Sankey de la figura 15, que el rendimiento de generación del conjunto de centrales y tecnologías de generación eléctrica del país es del 48%.

Para efectuar este cálculo hemos considerado, según la figura 15:

- el 15,6% del uso final de energía eléctrica,
- el 2,7% de las pérdidas de transporte, y
- el total del 38,1% de la generación eléctrica.

Y realizamos la siguiente operación:

Rendimiento generación eléctrica = (15,6 + 2,7) / 38,1 = 0,48 = 48%

Así, por cada 100 unidades de energía que entran en una central eléctrica, sólo 48 se transforman en energía eléctrica y el resto, 52, se pierde en forma de otros tipos de energía (principalmente calorífica en humos de combustión, etc.) en la propia central.

Recordad

Las transformaciones de la energía las hemos tratado en los apartados 1 y 2.

Pérdidas en el transporte de electricidad

Las redes eléctricas que transportan la energía tienen pérdidas y las podemos calcular a partir del propio diagrama de la figura 15.

La energía producida en las centrales es la suma de la energía eléctrica final (15,6%) y las pérdidas por transporte (2,7%). Así, el total producido en las centrales eléctricas es del 18,3%. Por lo tanto, las pérdidas por transporte corresponden, en porcentajes absolutos, al 14,75% de la energía generada por las centrales (el 2,7% representa un 14,75% del 18,3%, según la figura 15).

De este modo, el rendimiento global del sistema de generación eléctrica, considerando la energía que nos llega a los puntos de consumo (teniendo en cuenta las pérdidas de transformación y las de transporte) es del 40,9%.

O, dicho de otro modo, por cada kWh de energía eléctrica que llega a nuestra casa se habrán perdido 1,44 kWh.

Actividad 3.2. Rendimientos globales de conversión

El rendimiento global de las conversiones energéticas asociadas a la energía eléctrica, que se hace evidente al consultar los datos oficiales del sector energético disponibles, no siempre se conoce. Un ejemplo muy claro, y que no es aislado, lo podemos encontrar en una página web de un sistema de calefacción eléctrica, en el que se asegura lo siguiente (es un caso real, no inventado):

"El rendimiento de los radiadores X siempre es del 100%. En cambio las calderas [se entiende que de gas o gasóleo] están sujetas a un coeficiente de rendimiento que puede alcanzar el 90% cuando trabajan a plena potencia (calentamiento de agua sanitaria), pero que se reduce sensiblemente cuando trabajan sólo para calefacción y se reduce aún más, por debajo del 50%, si tenemos pocos radiadores en servicio".

¿Creéis que es cierta esta afirmación?

Solución

En realidad, esta afirmación no es falsa, es decir, un radiador eléctrico tiene un rendimiento próximo al 100% (el 100% absoluto no existe), pero no se está teniendo en cuenta que la energía eléctrica es un tipo de energía secundaria y que, por lo tanto, deberíamos tener en cuenta el rendimiento del sistema eléctrico que nos abastece, en este caso el español, y también la red de distribución. Por lo tanto, el rendimiento global será en realidad el producto de los dos rendimientos (el de transformación y transporte de la energía eléctrica, que es del 40,9%, según hemos visto, y el del aparato, próximo al 100%). Así, el rendimiento global de la aplicación será del 40,9%.

Para una caldera de gas o gasóleo, el rendimiento sí que es directamente el que obtenemos del aparato, ya que un combustible (gas o gasóleo) se transforma directamente en calor, y no debemos tener en cuenta ningún otro rendimiento.

Como conclusión del ejemplo, vemos que incluso en el momento de trabajo de menos rendimiento de la caldera de gas o gasóleo, que tendría un rendimiento del 50%, el rendimiento global de la transformación es más alto que el del radiador eléctrico, que en conjunto es del 40,9%.

Este ejercicio está muy ligado con la definición de sistema termodinámico, los límites y el entorno que hemos explicado al principio del módulo. Fijaos en que si definimos el sistema con límites en el aparato de calefacción, la afirmación es cierta; pero si el sistema contempla desde la energía primaria a la energía útil, el rendimiento global cambia.

Así, hemos de tener en cuenta que la energía eléctrica es un tipo de energía de gran calidad porque la podemos transformar fácilmente en otras formas de energía. No obstante, también hemos visto que lleva implícito un rendimiento de generación que habrá que tener presente, sobre todo si queremos comparar la eficiencia energética entre diferentes alternativas tecnológicas para satisfacer nuestras demandas. En general, para aquellas aplicaciones que no tienen sustituto posible (como la electrónica), será una buena opción, pero para la demanda de energía calorífica no será, ni mucho menos, una opción de buen rendimiento energético.

Recordad

En el subapartado 1.4 se ha comentado que la energía calorífica es uno de los tipos de energía de menos calidad. Tanto es así que las pérdidas de la mayoría de las transformaciones energéticas se transforman en calor.

Impactos ambientales (sociales y económicos) asociados a la energía eléctrica

Tal y como hemos explicado, la energía eléctrica no es una energía primaria, sino que la obtenemos de un proceso de transformación a partir de otros tipos de energía. Entre las diferentes opciones de generación, y que se explican posteriormente en el subapartado 3.2.1, tenemos las siguientes:

a) central térmica de gas natural, carbón o fuel,
b) central de ciclo combinado,
c) central nuclear,
d) energías renovables (eólica, solar fotovoltaica y biomasa).

En función de la tecnología que utilicemos para crear la energía eléctrica, tendremos unos impactos u otros. Veamos qué impactos ambientales están asociados a cada tipo de generación eléctrica.

Impactos del proceso de combustión

Actualmente, una gran parte de la energía eléctrica se obtiene a partir de un proceso de combustión (como sería el caso de las centrales térmicas o las de ciclo combinado que veremos en el subapartado 4.2). Es importante conocer bien cómo funciona el proceso de combustión y los impactos que se derivan de éste. En este apartado describiremos pues este proceso, así como los combustibles fósiles y los impactos asociados, entre los que destaca el cambio climático.

Descripción del proceso de combustión

El proceso de combustión se lleva a cabo a partir de un combustible (que puede ser petróleo, carbón, madera, etc.) mezclado con oxígeno.

El combustible está formado principalmente por carbón, hidrógeno y oxígeno y, en menor medida, por otros elementos como nitrógeno, azufre, fósforo, etc. (CHONSP). Los combustibles, mezclados con el oxígeno del aire (O_2) y con una chispa que haga detonar la combustión, se convierten en dióxido de carbono (CO_2) y vapor de agua (H_2O) y, en menor medida, en otros productos de combustión (óxidos de nitrógeno, cenizas, etc.). Así, al quemar estos combustibles, realizamos la conversión siguiente:

$$CHONSP + O_2 \rightarrow \text{Combustión} \rightarrow CO_2 + H_2O + \text{Otros componentes} \quad (40)$$

El proceso de combustión se lleva a cabo de la misma manera, tanto si quemamos madera como petróleo. Lo único que cambiará es la composición del combustible y, por lo tanto, parte de los productos de combustión. Todos estos productos están contenidos en los humos de combustión. Veamos cuál es el impacto ambiental asociado a estos productos de combustión.

Contaminantes del proceso de combustión

Los humos de combustión tienen dos tipos de contaminantes asociados:

- **Contaminantes primarios**: monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno (que provocan lluvia ácida) y partículas en suspensión (cenizas y polvo formadas por partículas de medida muy pequeña y que pueden penetrar en el organismo por las vías respiratorias). Estos contaminantes afectan principalmente a las zonas próximas al punto de emisión (chimenea, tubo de escape, etc.).

- **Contaminantes secundarios**: gases de efecto invernadero, principalmente dióxido de carbono. Estos contaminantes se diferencian de los otros porque tienen un efecto global, no sólo en el punto de emisión sino en todo el planeta.

Entre estos tipos de contaminantes, los primarios están mucho más localizados, ya que los problemas y los impactos se producen en el mismo lugar en el que se consume la energía, en el que se emiten los humos de combustión. También es importante tener en cuenta que este tipo de contaminantes existirá tanto si quemamos combustibles fósiles, como si quemamos madera.

Los secundarios, en cambio, tienen efectos globales, es decir, en partes del planeta en las que no existe ninguna central térmica y están asociados sólo a los combustibles fósiles.

Los gases de efecto invernadero son los responsables del denominado cambio climático, del que oímos hablar continuamente en los medios de comunicación. La emisión de gases de efecto invernadero está directamente vinculada al consumo energético de la sociedad, ya que la mayoría se genera en los procesos de combustión de los combustibles fósiles, que, como hemos visto en el diagrama de Sankey

de la figura 15, son la principal fuente energética actual. Pero ¿por qué los combustibles fósiles son los responsables del efecto invernadero? Para contestar a esta pregunta deberéis conocer el origen de los combustibles fósiles.

Origen y formación de los combustibles fósiles

Inicialmente, en el planeta Tierra no existía la atmósfera actual, ni tampoco los seres vivos actuales. Las bacterias y los vegetales captaban carbono del aire (que estaba presente en forma de dióxido de carbono) y emitían oxígeno mediante la fotosíntesis, igual que hacen actualmente las plantas. Es decir, con su respiración fueron creando la composición actual de la atmósfera, al reducir el dióxido de carbono y aumentar el oxígeno.

Una de las teorías de la formación del petróleo es que se produjo una acumulación de enormes cantidades de restos de animales marinos y de vegetales terrestres en los fondos marinos. Durante millones de años, mezclados con sedimentos y bajo la intensa acción de la compresión y el calor generado, se transformaron en petróleo y en gas. Es decir, el carbono que contienen los combustibles fósiles proviene de los restos fósiles de esta materia orgánica y de aquí el nombre de combustibles fósiles.

En el caso del carbón y del gas natural, el origen es el mismo: materia orgánica fósil que quedó atrapada durante los movimientos de placas tectónicas y que se transformó a causa de la presión y las altas temperaturas.

Los combustibles fósiles y el cambio climático

Teniendo en cuenta lo que acabamos de describir, el dióxido de carbono que había en el ambiente fue captado por las plantas y almacenado en el interior de la Tierra a modo de combustibles fósiles. Gracias a esta captación de dióxido de carbono de hace millones de años, la composición de la atmósfera y el clima actuales son los que son.

Por otro lado, a partir de la descripción del proceso de combustión, vemos que con la quema de combustibles fósiles estamos emitiendo este dióxido de carbono que fue captado por las plantas, el plancton y las bacterias de hace millones de años, y que hasta ahora estaba almacenado y retenido en los combustibles fósiles en el interior de la Tierra.

Así, la combustión intensiva de combustibles fósiles está alterando la composición de la atmósfera por la emisión de este dióxido de carbono captado hace millones de años por los organismos, y esto es lo que se conoce como **cambio climático**.

Nos podríamos preguntar: si quemamos madera, ¿no estamos emitiendo también dióxido de carbono y, por lo tanto, contribuyendo al efecto del cambio

climático? La respuesta es que no, ya que en este caso la madera proviene de un árbol que captó este dióxido de carbono hace, por ejemplo, cincuenta años, cuando la composición de la atmósfera ya era la actual. De este modo, su combustión cierra un ciclo del carbono de cincuenta años, que está equilibrado con los nuevos cultivos de árboles y, por lo tanto, no altera globalmente el contenido de dióxido de carbono en la atmósfera.

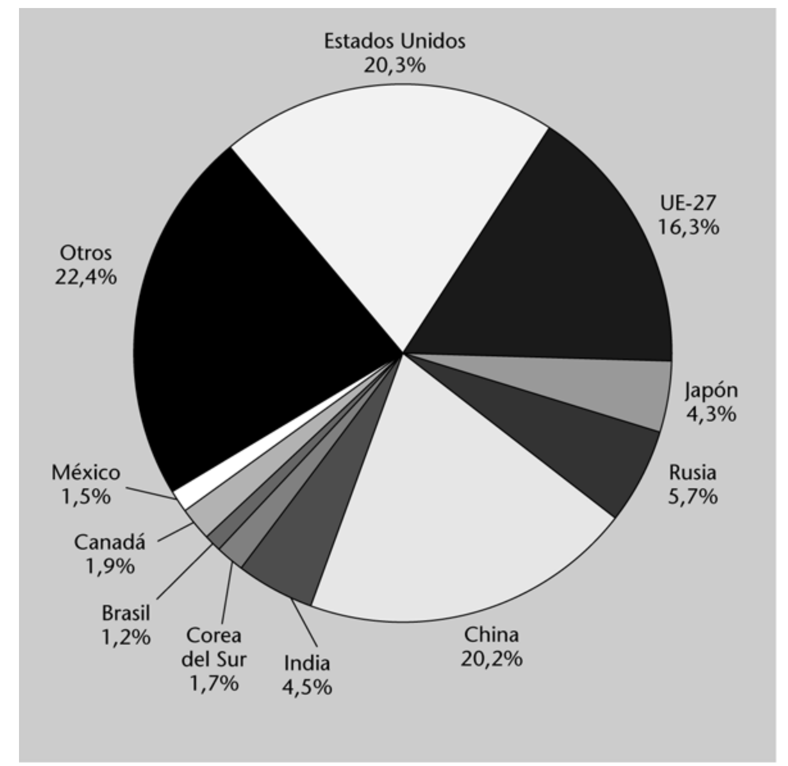
La combustión de combustibles fósiles, en cambio, cierra un ciclo del carbono de 3,5 millones de años y que NO está equilibrado con la captación de dióxido de carbono de las plantas y el plancton actuales, y por lo tanto está alterando la concentración de este gas en la atmósfera.

La emisión de gases de efecto invernadero en el mundo

Hay diferentes teorías sobre los efectos que este cambio en la composición de la atmósfera puede tener en el clima del planeta, pero si una cosa está clara es que es un problema que nos afecta a todos. Pero ¿todos somos igual de responsables? ¿Tiene sentido que llevemos a cabo políticas de reducción de gases de efecto invernadero si otros países no colaboran en ello?

Si miramos los datos de la figura 16, podemos pensar que no, ya que Estados Unidos y China son responsables del 40,5% de las emisiones mundiales.

Figura 16. Estructura de las emisiones de CO_2 en el 2006



Fuente: Datos extraídos de la Comisión Europea y la OCDE

El cambio climático es sin duda uno de los grandes retos a los que se enfrenta conjuntamente la población mundial, por lo que es necesario adoptar medidas comunes. Por otro lado, trabajar para cambiar el sistema energético y ha-

cerlo menos dependiente de las energías fósiles llevará a que, a la larga, la fiabilidad del suministro sea mayor. Si esto no se lleva a término actualmente, se debe al factor económico: hoy por hoy sale más barato (en términos económicos) consumir los combustibles fósiles que fomentar las energías renovables y adaptar el sistema actual a sus limitaciones.

Actividad 3.3. Continuación de la auditoría energética en casa

Continuamos con la auditoría energética de nuestra casa, pero ahora calculamos la clasificación de nuestro hogar en función de las emisiones. Hacedlo de la manera siguiente:

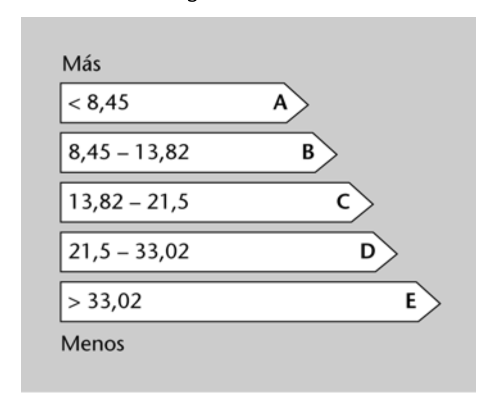
1. Tomad las facturas de suministro energético (gas y electricidad) del último año y calculad vuestro consumo anual en kWh.

2. Calculad ahora las emisiones asociadas a cada tipo de energía, utilizando los siguientes factores de conversión:
a) 1 kWh eléctrico = 0,45315 kg CO_2
b) 1 kWh gas = 0,20098 kg CO_2

3. Calculad, a partir de la superficie de vuestro hogar, las emisiones generadas por metro cuadrado: kg CO_2/m^2 por año (dividid las emisiones anuales por la superficie del piso).

4. Con estos valores, clasificad vuestra vivienda según la siguiente escala:

Clasificación energética de la vivienda



Según el actual sistema de certificación de edificios de nueva construcción establecido por Real Decreto 47/2007, de 19 de enero

Observación

La escala de clasificación se ha obtenido siguiendo el procedimiento establecido en el documento *Escala de Calificación Energética para Edificios de Nueva Construcción* editado por el Ministerio de Vivienda y por el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, para Barcelona (zona climática C2) y para edificios de viviendas. Si cambia la ubicación de la vivienda o el tipo de edificio, la escala ya no es aplicable.

5. Valorad, siguiendo los baremos siguientes, qué tipo de vivienda tenéis respecto a las emisiones:
a) Si obtenéis una clasificación A o B, vuestra vivienda es muy eficiente y realizáis una buena gestión de la energía. Seguro que seguís recomendaciones de ahorro y eficiencia energética.

b) Si obtenéis una clasificación C, tenéis una vivienda de tipo medio, y seguro que tenéis opción de realizar una mejora que os ayude a reducir el consumo energético.

c) Si la clasificación que obtenéis es D o E, se puede decir que, en términos actuales, la vivienda no es eficiente en ahorro y seguramente podéis adoptar medidas que os ayuden a mejorar su comportamiento.

Los residuos nucleares

Uno de los impactos de la energía nuclear (que se describe en el apartado 4.3) son los residuos que ésta genera. El combustible que se utiliza, una vez agotado, se mantiene radioactivo durante **millones** de años. Estos residuos, si bien se generan en poca cantidad en relación con la energía obtenida, se deben ges-

tionar correctamente para evitar que puedan afectar al medio ambiente con su radiación y producir impactos irreversibles sobre el ecosistema.

Actualmente, la mayor parte del combustible nuclear agotado en el Estado español está almacenado en las centrales nucleares, pero en un futuro se deberá gestionar fuera de éstas. Entre las diferentes opciones de gestión se hallan las siguientes:

- Disposición geológica profunda: es la más segura. Consiste en buscar una zona de terreno que cumpla ciertas características geológicas que confinen la radioactividad de estos materiales y enterrarlos allí, con la vigilancia debida, por el período (millones de años) que dura la radioactividad de los materiales.

- Enterrarlos en fosas oceánicas o en los fondos marinos, pero esta opción no aporta la seguridad suficiente en cuanto a control social, por lo que se podrían dar situaciones de riesgo en caso de mala manipulación. Por lo tanto, es una opción con pocas posibilidades de llevarse a cabo, ya que podría suponer un riesgo de seguridad para la población mundial.

- Enviarlos al espacio. En este caso tampoco existe una seguridad absoluta en el control de las cápsulas de residuos enviadas al espacio, que, incluso, podrían volver a chocar con la superficie de la Tierra. Las pocas garantías de seguridad provocan que esta opción también se descarte.

Residuos nucleares

Los residuos nucleares pueden tener efectos muy graves en la población y el planeta a causa de la emisión de radioactividad. Si los almacenes de residuos nucleares no tienen las medidas de seguridad suficientes, los residuos se podrían robar y utilizar en acciones terroristas. A este aspecto nos referimos cuando hablamos del control social de los residuos nucleares.

Sea como sea, el uso de la energía nuclear genera unos residuos radioactivos durante millones de años que es necesario tener en cuenta. Es cierto que no se emiten gases de efecto invernadero, ya que no hay proceso de combustión, pero no es cierto que sea una energía limpia, teniendo en cuenta que genera unos residuos muy peligrosos que se deben tener en cuenta a la hora de planificar la generación energética.

Impacto social

Como hemos ido viendo, el sistema energético actual depende mucho de los recursos fósiles ubicados fuera del territorio en el que se consume la energía, lo que provoca que haya conflictos geoestratégicos a escala mundial por el control de estos recursos. Esto sucede para los fósiles y también para el uranio de las centrales nucleares.

Sin embargo, este aspecto a menudo no se tiene en cuenta, o se pasa por alto. Asimismo, su coste global en el ámbito social, económico (costes de armamento) y ambiental no es despreciable.

Las energías renovables: ¿energía sin impacto?

Las energías renovables representan, dentro del abanico de posibilidades de obtención de energía final, las energías con menos impacto global.

1) En primer lugar, la fuente que utilizan (radiación solar, viento, agua, etc.) es un recurso local y renovable:

- Local, porque está ubicado en el lugar en el que se genera y necesita la energía y, por lo tanto, no implica dependencia exterior ni todos los impactos asociados (conflictos por el control de recursos, etc.).

- Renovable, ya que el uso del recursos no implica un agotamiento, sino que su existencia es independiente de que la usemos o no. El viento no dejará de existir por más molinos que pongamos en el territorio, ni la radiación del sol disminuirá por más captadores que instalemos.

Recursos renovables locales

Los recursos renovables son locales, es decir, provienen del propio territorio. Por el contrario, la energía eléctrica no se genera allí donde existe la demanda (que sería, por ejemplo, en las ciudades), sino que se produce en zonas alejadas, como las zonas rurales, que generan más energía eléctrica de la que necesitan. Este problema lo presentan las energías convencionales y algunas energías renovables.

2) En segundo lugar, no producen emisiones ni contaminantes en la generación energética, sólo en las fases de construcción y de desmantelamiento de las instalaciones, igual que el resto de las tecnologías.

Las energías renovables son, pues, actualmente, la única alternativa real a la generación de electricidad y la satisfacción de la demanda energética sin el uso de recursos fósiles y finitos.

No obstante, a menudo encontramos ejemplos de municipios que quieren llevar a cabo un proyecto de instalación de molinos eólicos y parece que todo el mundo se vuelca en contra de él por el impacto paisajístico o visual que estas instalaciones tienen en el territorio. Podríamos decir que el impacto visual, de alteración del paisaje rural, es el único impacto que tienen estas energías, ya que son instalaciones de tipo extensivo, es decir, ocupan mucha superficie de territorio para obtener una buena cantidad de energía.

En cualquier caso, lo mejor es racionalizar el consumo de energía y hacer un buen uso de ella (no emplear los aires acondicionados con las ventanas abiertas, poner la calefacción a temperaturas adecuadas, etc.), ya que, como se dice a menudo, la mejor energía es la que no se consume.

3.2. Los agentes del mercado eléctrico

Hasta ahora hemos dado una pincelada a las demandas energéticas de la sociedad, al mercado eléctrico y al impacto de este sistema. La energía eléctrica es, como ya hemos comentado, un tipo de energía secundaria que proviene de la transformación de otros tipos de energía.

A continuación describiremos, a grandes rasgos, cómo funciona el mercado eléctrico y cuáles son los agentes que lo forman.

La complejidad de este sistema se debe al hecho de que la energía eléctrica, como ya hemos comentado, se genera instantáneamente en el momento

en el que se consume. Así, cuando encendemos una luz, el kilovatio por hora (kWh) no está almacenado en el enchufe, esperando a que lo consumamos, sino que la energía necesaria para encender la bombilla se genera, en algún lugar del territorio, en el preciso instante en el que conectamos la luz.

De este modo, a diferencia del gas o del petróleo, que los podemos tener almacenados en depósitos y suministrarlos en función de la demanda, el sistema eléctrico precisa una infraestructura mucho más complicada para poder satisfacer en cada momento la demanda generada.

En este apartado describiremos los diferentes agentes que interactúan en el sistema eléctrico para hacer que éste funcione, la mayor parte del tiempo, sin problemas. Éstos agentes son:

1) los productores,
2) el sistema de transformación y transporte,
3) los comercializadores,
4) los consumidores, y
5) el operador del mercado ibérico de energía.

3.2.1. Productores: el *mix* de generación

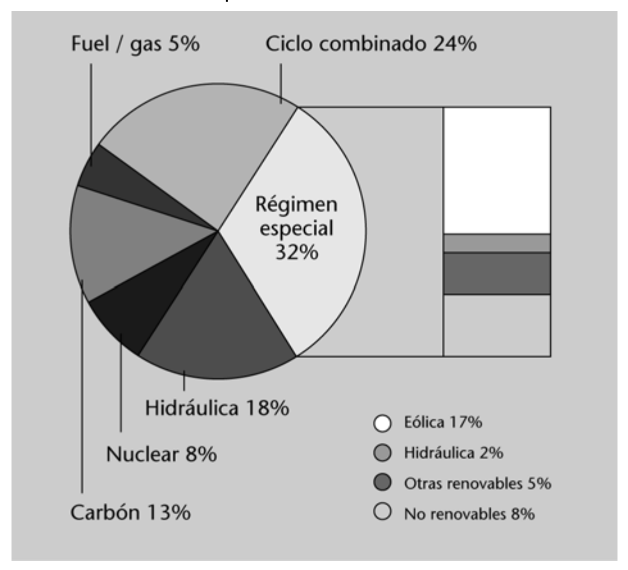
Lo primero que es necesario para que pueda existir el sistema eléctrico son los productores.

Los productores son las instalaciones que transforman algún tipo de energía primaria en energía eléctrica.

Hay dos datos que deberemos tener en cuenta para valorar correctamente los productores eléctricos: la potencia instalada y la cobertura de la demanda anual de energía.

1) La potencia instalada nos muestra cuál es el parque de centrales eléctricas, existentes y en funcionamiento, que pueden generar energía eléctrica, si es necesario. En la figura 17 se muestran los tipos de centrales eléctricas que formaban la potencia instalada peninsular (90.878 MW) el 31 de diciembre del 2008. Fijaos sólo en la estructura general de los productores; los diferentes tipos los explicaremos más adelante en este apartado.

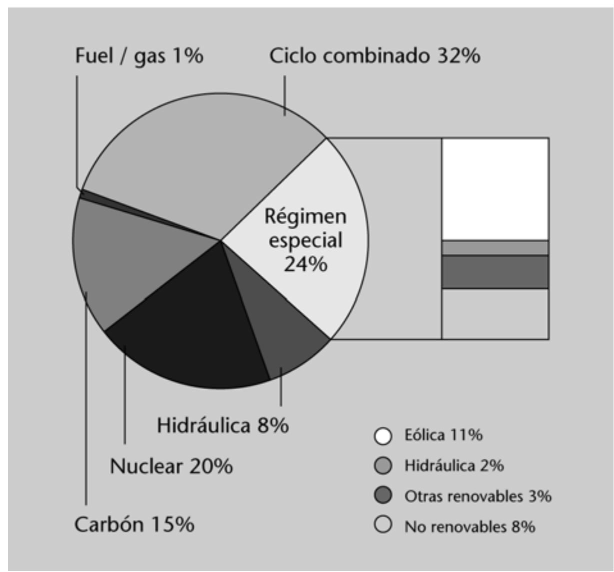
Figura 17. Potencia instalada el 31 de diciembre del 2008 en el sistema eléctrico peninsular



Fuente: Adaptado de *El sistema eléctrico español 2008*. Red Eléctrica de España

En este parque de centrales eléctricas, no todas funcionan el mismo número de horas y, por lo tanto, generan una cantidad de energía eléctrica que no está directamente relacionada con su potencia. Si queremos saber qué tipo de central eléctrica ha producido efectivamente la energía eléctrica consumida, deberemos mirar la **cobertura de la demanda anual de energía**, que para el 2008 es la que se muestra en la figura 18 (como antes, fijaos, sólo en la estructura de los productores; explicaremos los diferentes tipos más adelante en este apartado). Esta figura es la que se denomina *mix* de generación.

Figura 18. Cobertura de la demanda anual de energía eléctrica peninsular para el 2008



Fuente: Adaptado de *El sistema eléctrico español 2008*. Red Eléctrica de España

Por ejemplo, observemos cómo las nucleares, que representan sólo un 8% de la potencia instalada, acaban dando cobertura al 20% de la demanda. Esto se debe al hecho de que las centrales nucleares no se paran nunca (sólo por paros de mantenimiento), hecho que permite que su generación sea continua. Esto, sin embargo, se explicará con más detalle en el subapartado 4.3.

Las centrales de producción de energía eléctrica se dividen en dos grandes grupos: el régimen ordinario y el régimen especial. Esta clasificación responde a la necesidad que tiene actualmente el Gobierno de incentivar económicamente ciertas tecnologías energéticas. Así, tenemos:

1) Régimen especial: son aquellas tecnologías energéticas más limpias y eficientes, pero que económicamente no son viables por sí solas, con lo que el Gobierno las incentiva de manera diferente.

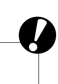
2) Régimen ordinario: son el resto de las centrales, las convencionales. Entre éstas se encuentran:

- las centrales térmicas de fuel, gas y carbón (subapartado 4.2),
- las centrales de ciclo combinado (subapartado 4.2.4),
- las centrales nucleares (subapartado 4.3), y
- las centrales hidráulicas (las grandes presas, que no trataremos en este módulo).

Pasemos a ver qué tipos de centrales corresponden al régimen especial. Actualmente, la definición de las tecnologías de régimen especial aparece en el artículo 27 de la ley del sector eléctrico, en la que se detalla que la actividad de producción de energía eléctrica tendrá la consideración de producción en régimen especial en los casos siguientes (siempre que la potencia de las instalaciones no supere los 50 MW):

a) cuando se trate de autoproductores que utilicen la cogeneración (generación de calor y electricidad de manera simultánea) u otras formas de producción de electricidad asociadas a actividades no eléctricas, siempre que aporten un rendimiento energético alto;

b) cuando se utilice como energía primaria alguna de las energías renovables no consumibles (eólica o solar), biomasa o cualquier tipo de biocarburante, y



Podéis ver las diferentes transformaciones del calor en los apartados 1 y 2 de este módulo didáctico.

c) cuando se utilicen residuos no renovables como energía primaria. Los residuos pueden ser municipales, agrícolas o ganaderos.

Es decir, se pueden inscribir en la producción eléctrica en régimen especial aquellos productores que tienen instalaciones de energías renovables o de alta eficiencia y que, además, son de poca potencia. ¿Significa esto que las energías renovables nunca son económicamente viables y que, por lo tanto, es necesario que detrás de éstas existan unos incentivos económicos por parte del Gobierno?

En realidad, no. Lo que existe, como en todas las instalaciones, es una economía de escala. Los grandes parques eólicos que se encuentran en Navarra o en la Muela (provincia de Zaragoza) generan tanta energía que es más rentable promover la instalación sin ninguna ayuda. Lo que no es viable económicamente es instalar tres molinos o cuatro seguidores fotovoltaicos y, por ello, en estos casos, es necesario un incentivo económico.

Los incentivos a la producción solar fotovoltaica

Es necesario comentar una curiosidad de este sistema de incentivos. En un momento, concretamente durante el período 2007-2008, se incentivó de tal manera la producción solar fotovoltaica que este tipo de plantas de producción de energía eléctrica a partir del sol proliferó espectacularmente por todo el territorio. También hay que señalar que hubo quien hizo ciertas "trampas legales" con estas instalaciones, ya que las inscribían como dos instalaciones, en lugar de una, para no sobrepasar el límite de potencia establecido. Sea como sea, este escenario tan propicio para la energía solar fotovoltaica provocó que, a mediados del 2007, se alcanzaran para esta tecnología los objetivos que estaban previstos para el 2010. Enseguida, sin embargo, el Gobierno rectificó el marco legal y ahora no promociona tanto esta energía.

En resumen, hay dos tipos de productores: los de régimen ordinario (todas las centrales térmicas y nucleares) y los de régimen especial. Estos dos últimos son de energías renovables o de alta eficiencia energética (como la cogeneración) y tienen una potencia total más baja que la de las centrales convencionales.

Cogeneración

La cogeneración es el proceso por el que se genera electricidad y calor. Las empresas con un proceso que necesita mucha energía térmica instalan centrales de cogeneración y así aprovechan la quema de combustible, que también se llevaría a cabo para obtener calor, para generar electricidad. Dado que los equipos de cogeneración son más caros que los que sólo producen calor, se trata de una tecnología eficiente que está subvencionada.

3.2.2. Transformación y distribución

Una vez que la energía eléctrica ha sido producida, ésta debe "viajar" hasta el punto de consumo o de demanda. Para llevarlo a cabo, existen las líneas eléctricas de distribución.

La energía eléctrica se desplaza en forma de corriente alterna por las líneas eléctricas.

Estas líneas son de diferentes tipos en función de la tensión o el voltaje con el que transporten la energía.

1) En todo el territorio existe una red de alta tensión que interconecta todos los puntos. Es de gran voltaje por dos motivos:

a) disminuir las pérdidas que se generan en el transporte de la energía eléctrica, y

b) disminuir la sección de cable necesaria para realizar el transporte.

Asimismo, estas líneas tienen una gran amplitud, dado que los conductores eléctricos deben estar a una distancia mínima para evitar que se creen arcos eléctricos entre las líneas. Todas las líneas de alta tensión del territorio español son propiedad de la empresa Red Eléctrica de España, S. A., que tiene el monopolio.

2) De estas grandes líneas se pasa a las líneas de media tensión, que son líneas de menor envergadura que recorren áreas de alcance regional.

3) Además, están las líneas de baja tensión, que son las que discurren por el interior de las zonas habitadas, a menudo con un único cableado.

Para pasar de una línea a otra se necesitan centros de transformación intermedios que reducen o aumentan el voltaje de la corriente de entrada.

Estas instalaciones son necesarias para garantizar, en todo momento, el suministro fiable y de calidad en cualquier punto del territorio.

3.2.3. Comercializadores

Una vez generada y distribuida, la energía se vende por medio de un contrato con el consumidor final. Los consumidores firman este contrato con una empresa comercializadora.

Comercializadores

Una lista de comercializadores se puede consultar en la web del Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE):

- www.idae.es

Este aspecto es relativamente nuevo en el territorio español. Anteriormente, el coste de la energía eléctrica para el consumidor doméstico estaba protegido legalmente por el Gobierno. Así, era mucho más barato tener el contrato de suministro de energía eléctrica con la distribuidora de energía local, es decir, la propietaria de las líneas eléctricas que llegan a nuestro hogar, que tenerlo con una comercializadora que estuviese comprando la energía en el mercado libre. Es lo que se conocía como tarifa regulada.

A raíz de la liberalización del mercado eléctrico se vio que una de las partes del sistema que no se podía liberar eran las líneas de distribución, ya que no tendría sentido que se llenara el territorio y las calles de infraestructuras de transporte de energía eléctrica. Las distribuidoras, por lo tanto, mantienen su monopolio exclusivo pero no son las que tienen el contrato con los consumidores. Ahora son las comercializadoras las que poseen estos contratos.

3.2.4. Consumidores

Los consumidores somos aquellos que tenemos una demanda de energía. Los consumidores nos clasificamos por la potencia contratada y la tensión o el voltaje de suministro que tenemos.

En nuestros hogares, lo más normal es tener una potencia contratada de entre 4,4 y 6,6 kW. Si todos los elementos del hogar son eléctricos (cocina de inducción, calefacción eléctrica, etc.), seguramente la potencia contratada será superior.

Así, podemos dividir a los consumidores de energía eléctrica en tres grupos, en función de la potencia contratada y de la tensión de conexión:

1) personas consumidoras en baja tensión (BT), familias y pymes, con una potencia contratada inferior o igual a 10 kW (10 kW);

2) personas consumidoras en baja tensión (BT) con una potencia contratada superior a 10 kW (> 10 kW), y

3) personas consumidoras en media (MT) o alta tensión (AT).

De estos tres grupos, los dos últimos deben estar obligatoriamente en un mercado libre.

Así, como consumidores de baja tensión tendremos un contrato con una comercializadora, que será la empresa encargada de nuestro suministro. Antes, en función del punto de consumo, el contrato debía firmarse obligatoriamente con la distribuidora local de energía, sin ninguna alternativa. Ahora podemos solicitar ofertas a diferentes comercializadores y contratar la que nos ofrezca un precio mejor. También podremos contratar energía de comercializadores que sólo suministren energías renovables.

En algunos casos existen grandes consumidores que van directamente al mercado eléctrico, sin tener como intermediarios a las comercializadoras. Eso sólo resulta rentable a las industrias que consumen una gran cantidad de energía.

3.2.5. El operador del mercado ibérico de energía

Hasta ahora hemos visto los diferentes agentes que forman el mercado eléctrico, pero si, como hemos dicho al principio, el productor genera en cada instante la energía eléctrica que consumimos, ¿como se coordinan los consumidores y los productores? El operador del mercado ibérico de energía (OMEL) es el responsable de ello.

Para entenderlo mejor, a continuación os detallamos la secuencia que se lleva a cabo a diario para coordinar la producción y el consumo de energía. Para hacerlo nos ayudaremos de la figura 19, en la que se muestran los resultados del mercado eléctrico para cada hora del mercado eléctrico diario:

1) Las comercializadoras realizan una previsión de lo que consumirán sus clientes y, para cada hora, se obtienen unas previsiones de demanda.

2) Posteriormente, los productores ofrecen, para cada hora, la energía que podrán producir y a qué precio lo harán.

3) El OMEL cruza los dos datos y para cada hora se obtiene un precio de casación (en el que se cruzan las curvas de demanda y la de oferta), al que se venderá y se comprará la energía en esa hora. El precio al que cobrarán la energía los productores será el precio de casación, es decir, pueden haber ofrecido la energía a 3 c€/kWh, pero la cobrarán a 5 c€/kWh producido si son las 10 del día 26 de noviembre del 2009 (según la figura 19).

c€

c€ significa céntimos de euro, es decir, que al multiplicar un valor en c€ por 100, obtenemos el valor en euros.

4) El OMEL consulta al operador de la red de distribución de alta tensión, que es REE (como hemos explicado en el apartado 3.2.2), si es técnicamente viable para el sistema eléctrico el perfil de producción que se obtiene cada hora. Si es necesario, en función de la viabilidad técnica, se retoca.

REE

REE son las siglas de Red Eléctrica de España.

Los resultados finales obtenidos del funcionamiento del mercado eléctrico se pueden consultar, además de muchos otros dados del sistema eléctrico, en la web de OMEL (www.omel.es).

Figura 19. Precio del mercado diario de electricidad para el día 26 de noviembre del 2009

Fuente: Adaptado del operador del mercado ibérico de energía (www.omel.es).

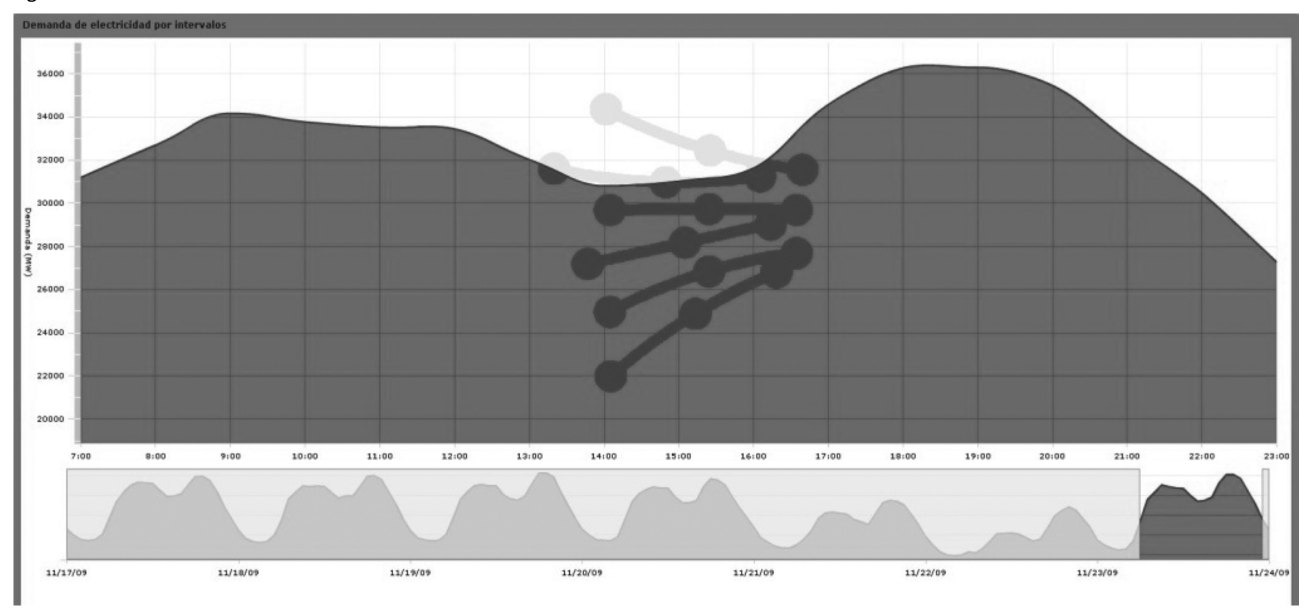
¿Con eso es suficiente? ¿Qué sucede cuando no hace viento y un productor que tiene un parque eólico no genera la cantidad de energía que había dicho que produciría? Para ello existen dos mecanismos adicionales:

1) El mercado intradiario: para cada hora existe un mercado paralelo en el que se acaban de ajustar las necesidades de los consumidores y de los productores, a un precio diferente del de casación.

2) La garantía de potencia: cada día, y en todo momento, hay algunas centrales eléctricas térmicas o de ciclo combinado que están "preparadas" para producir electricidad en cualquier momento en el que se les pida. Así, si se produce alguna incidencia y no se cubre la demanda en algún momento, se les comunica que produzcan energía y que comiencen a producirla inmediatamente.

A los consumidores les puede extrañar que se pueda prever nuestro consumo individual, ya que un día llegamos a casa antes y encendemos todas las luces y ponemos la lavadora, mientras que otro día estaremos fuera y no consumiremos nada. Y en ningún momento llamamos a la comercializadora eléctrica para contárselo. Por lo tanto, ¿cómo lo pueden saber? Curiosamente, aunque nuestro comportamiento individual no sea igual cada día, como sociedad sí tenemos un comportamiento homogéneo. Se trata de una curva de consumo que varía sobre todo estacionalmente, pero que en general es muy estable. Podéis ver un ejemplo de esto en la figura 20, concretamente una curva típicamente invernal.

Figura 20. Curva de demanda de electricidad del 17 al 24 de noviembre del 2009

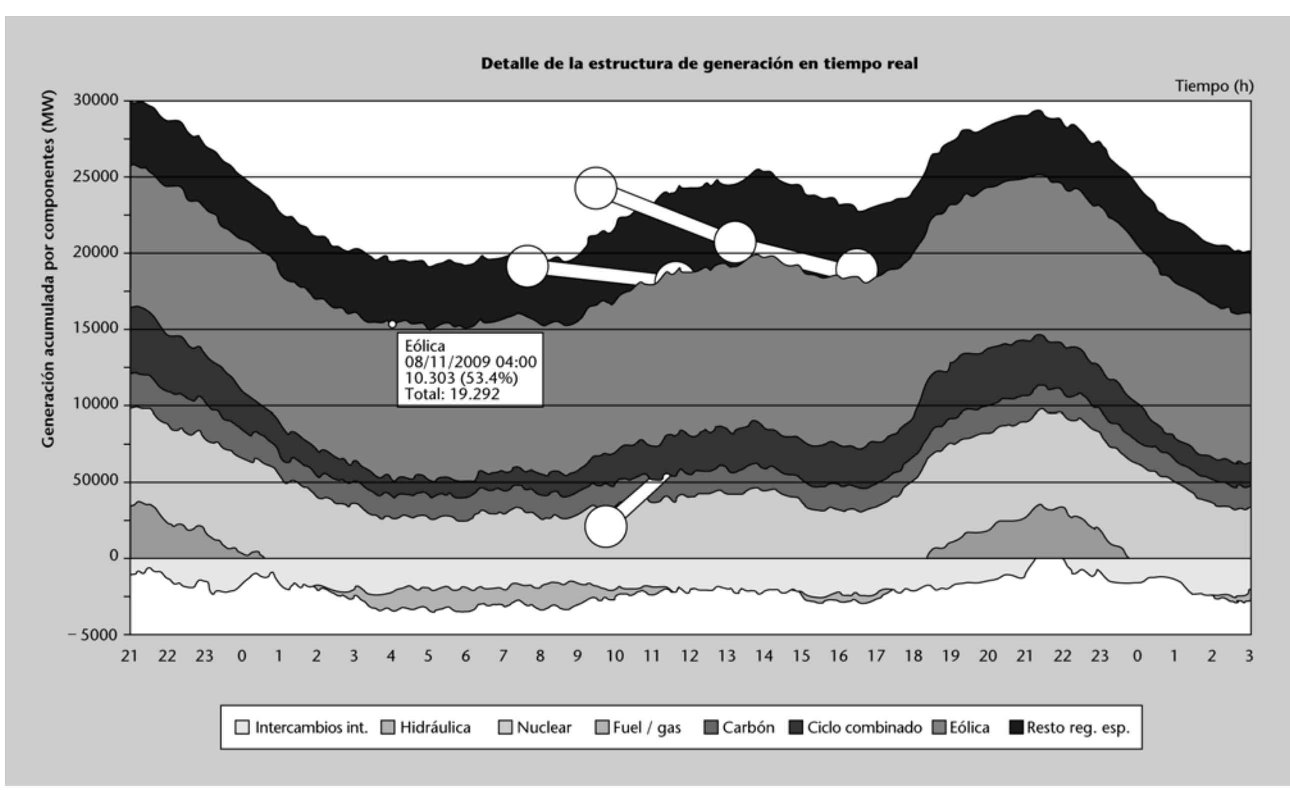


Fuente: Red Eléctrica de España (www.ree.es)

Estas curvas evolucionan con el tiempo y, de hecho, algún año el pico de consumo anual, es decir, el día con más demanda eléctrica, se ha dado en el verano, debido a los aires acondicionados, cuando tradicionalmente el pico de consumo coincide con el día más frío del invierno.

Para acabar esta descripción de la energía y del mercado eléctrico, queremos adjuntaros la curva de generación eléctrica de uno de los días en los que se dio un máximo de producción eólica (la franja con el recuadro de la figura 21).

Figura 21. Curva de detalle de la estructura de generación eléctrica en tiempo real del día 8 de noviembre del 2009



Fuente: Adaptado de Red Eléctrica de España (www.ree.es)

Aquel día, este tipo de energía representó el 53,4% de la energía generada. Poco a poco, al superar las limitaciones que tienen actualmente las energías renovables, será necesario llegar a perfiles de generación como los de la figura 21, en la que las emisiones de CO_2 sean una curiosidad de la minoría de centrales eléctricas.

3.3. ¿Qué hemos aprendido?

Hemos visto que la energía es un factor clave en nuestra sociedad y que el sistema que nos permite producir, transportar y consumir energía eléctrica es muy completo. También hemos detallado los diferentes impactos medioambientales, entre los que destaca el cambio climático, y hemos aprendido que el sistema energético actual depende mayoritariamente de los combustibles fósiles, que provienen de otros países.

Hemos enumerado los diferentes tipos de centrales eléctricas, pero no conocemos bien su funcionamiento. Así, en el siguiente apartado pasaremos a describir con detalle el funcionamiento de las centrales térmicas, que representan actualmente más de la mitad de la generación eléctrica.

4. Energía térmica y energía nuclear

Hasta ahora hemos hecho un repaso al sistema energético mundial, pero sobre todo español y, más concretamente, hemos analizado el sistema eléctrico. Tenemos, pues, hasta este punto, una visión general de las principales características del sistema energético, de sus propiedades, de sus carencias y de su funcionamiento.

A partir de este punto, entrarermos a conocer más concretamente las características de algunas de las centrales eléctricas que forman parte del conjunto de potencia instalada actualmente en el Estado español. En concreto, en este apartado trataremos los tipos de central siguientes (se indica para cada uno la potencia instalada a España a finales del 2008 y el porcentaje de cobertura de demanda que representó a lo largo de ese mismo año, con los datos extraídos de las figuras del subapartado 3.2.1):

Tabla 4

Tipos de central	Potencia instalada	Cobertura anual de la demanda en el año 2008
Central térmica	18%	16%
Central de ciclo combinado	24%	32%
Central nuclear	8%	20%

En total, las tecnologías descritas en este apartado 4 representan el 50% de la potencia instalada en el Estado y cubren el 68% de la demanda anual. Son, por lo tanto, las tecnologías mayoritarias en cuanto a cobertura de la demanda eléctrica actual.

Además de las centrales térmicas, también hay las centrales hidráulicas, que son las grandes presas hidroeléctricas. Esta tecnología queda fuera del alcance de esta asignatura y por lo tanto no se explicará. Únicamente indicaremos que la energía hidráulica representa un 18% de la potencia instalada y un 8% de la energía generada durante el 2008, como podéis comprobar con los datos adjuntados en el subapartado 3.2.1.

En apartados posteriores hablamos de las tecnologías renovables, que están incluidas dentro de las tecnologías de régimen especial descritas en el subapartado 3.2.1. Las centrales de régimen especial representan un 32% de la potencia instalada y un 24% de la energía generada.

¿Qué aprenderemos?

- Veremos el rendimiento de las diferentes conversiones energéticas con la tecnología actual;

- enumeraremos los combustibles habituales de las centrales térmicas;
- analizaremos los ciclos termodinámicos que se llevan a cabo en las centrales térmicas;
- conoceremos las diferentes partes y elementos que forman las centrales térmicas actuales;
- describiremos el funcionamiento de una central nuclear;
- detallaremos los impactos asociados a la tecnología nuclear.

¿Qué supondremos?

Supondremos que tenéis claros los conceptos y las magnitudes propias de la termodinámica, como la presión, la temperatura y la entropía, y que también conocéis las representaciones gráficas de los ciclos termodinámicos.

4.1. Las transformaciones de energía

Antes de comenzar, conviene que hagamos una recapitulación de los principios básicos de la termodinámica, que ya hemos desarrollado al principio de módulo, pero que es necesario tener presentes para entender las conversiones de energía que se producen en una central térmica.

Como se ha mencionado al explicar el primer principio de la termodinámica en el subapartado 2.5, en cualquier proceso, la energía ni se crea ni se destruye, sino que se conserva. Y como se ha detallado en el segundo principio, no todas las formas de energía se pueden transformar en trabajo útil con la misma facilidad. Es decir, la calidad de la conversión dependerá del tipo de energía inicial, de la calidad de ésta. Y, además, hemos de añadir otro factor en todas estas consideraciones. Un factor más técnico y menos científico: la tecnología disponible.

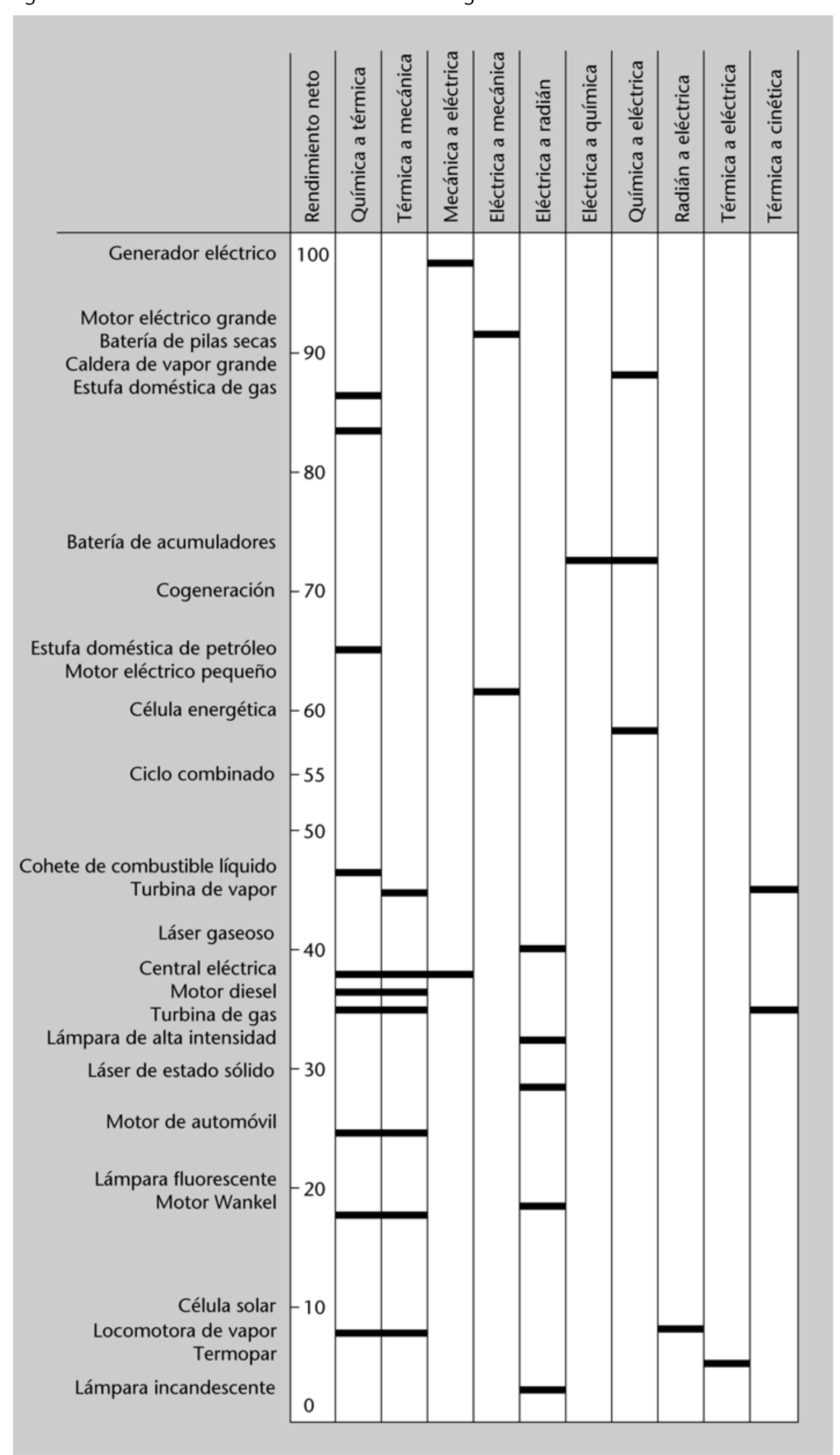
Hasta ahora no se han inventado todas las tecnologías para permitir ciertas transformaciones entre diferentes formas de energía. Y, de las tecnologías disponibles, no todas tienen el mismo rendimiento. En este sentido, y para acabar con este breve recordatorio, en la figura 22 tenéis una tabla resumen con el rendimiento de los diferentes convertidores de energía.

Recordad

Recordad que en el apartado 1 hemos hablado de diferentes transformaciones de energía en situaciones cotidianas.

Sin duda, es un cuadro que requiere un momento de revisión. En primer lugar, ¿qué tecnología tiene un rendimiento más bajo? La lámpara incandescente, con un rendimiento del 5%. Si recuperamos lo que decíamos en el ejemplo del calentador eléctrico (en el apartado 3.1.5.), y al rendimiento de la tecnología le aplicamos el rendimiento del sistema energético (40,9%), tenemos un rendimiento total de iluminación de la lámpara incandescente del 2%. ¡Realmente bajo!

Figura 22. Rendimientos de los convertidores de energía



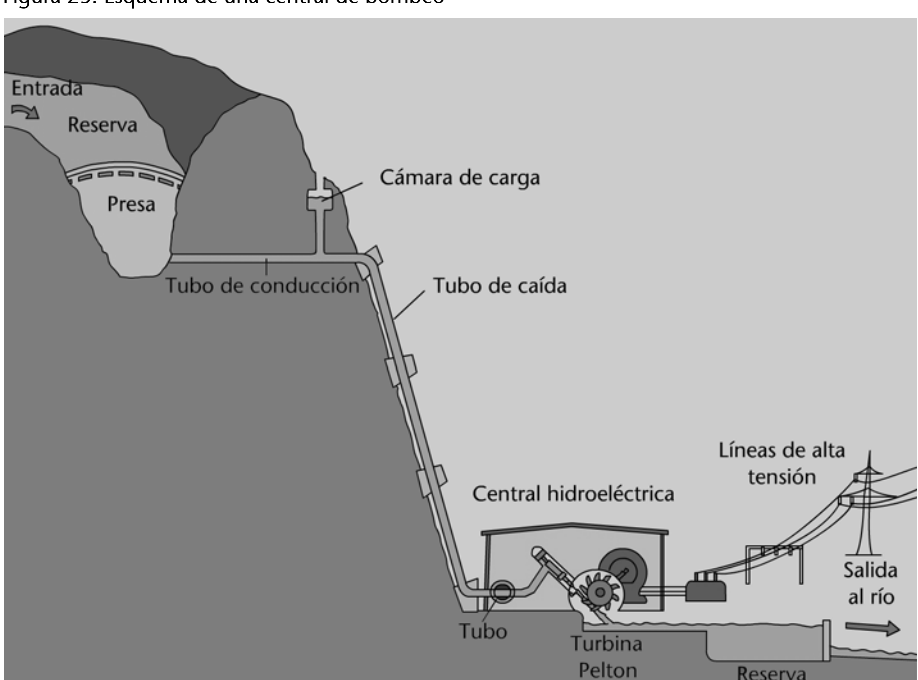
Fuente: Adaptado de *Tecnología energética* (UPC)

¿Y qué sucede con el 95% de la energía eléctrica que consumen las lámparas incandescentes y no se convierte en luz? ¡Pues que se convierte en calor! ¿Quién no se ha quemado alguna vez al tocar una lámpara metálica con una bombilla incandescente que llevaba un rato funcionando? Sin embargo, cabe señalar que desde septiembre del 2009, la Unión Europea ha prohibido la fa-

bricación y la importación de este tipo de luces y, por lo tanto (cuando se hayan terminado las reservas), ya no será posible comprarlas.

En la parte más alta del rendimiento, nos encontramos con las conversiones de energía mecánica a eléctrica (99%) y también con la inversa, de eléctrica a mecánica (94%). Estos rendimientos tan altos provocan que las centrales de bombeo sean una opción muy eficiente para regular los sistemas eléctricos. Estas centrales tienen dos embalses de agua conectados con cañerías. Cuando sobra energía eléctrica en la red, comienzan a bombear agua hacia el embalse superior, con un rendimiento del 94%. Cuando falta energía, el agua baja desde el embalse superior hasta el inferior, y así se obtiene energía con un rendimiento del 99%. En total, habremos tenido un rendimiento global del 93%, que sin duda es más alto que, por ejemplo, el rendimiento de acumular la energía en baterías (que tienen un rendimiento del 74%). Un esquema de estos tipos de centrales se puede ver en la figura 23, que muestra la central al final de un tubo de caída de agua. El agua hace girar la turbina y genera electricidad.

Figura 23. Esquema de una central de bombeo



Recordad

La ley de Faraday, que habéis visto en el módulo de magnetostática: la turbina emplea esta ley. La turbina hace girar un alternador, que es una bobina que gira dentro de un campo magnético constante.

Una vez vistos estos aspectos de la transformación de energía, pasamos a ver cómo se transforman los diferentes tipos de energía eléctrica, en los diferentes tipos de centrales eléctricas.

4.2. Central térmica

Las centrales térmicas o termoeléctricas son las que generan electricidad a partir de combustibles fósiles.

En este apartado describiremos las principales características de funcionamiento de estas centrales, desde los combustibles que pueden abastecerlas hasta el ciclo termodinámico que se produce en la conversión de energía eléctrica.

Posteriormente describiremos las dos tecnologías principales que se usan en las centrales: la turbina de vapor y la turbina de gas. Como podréis comprobar, no es con la combustión como tiene lugar la producción de energía eléctrica, sino que el paso de los humos calientes de la combustión o el vapor de agua hacen girar la turbina por la que pasan y ello genera electricidad.

4.2.1. Combustibles

Las centrales térmicas funcionan, principalmente, con tres combustibles:

1) Carbón: se trata de un combustible fósil en estado sólido.
2) Derivados del petróleo (fuel o gasóleo): son combustibles fósiles, obtenidos del refinamiento del petróleo.
3) Gas natural: es un combustible fósil en estado gaseoso, formado por diferentes proporciones de gases como el metano, el propano, el butano, etc.

Hay otras centrales que funcionan con una combinación de estos combustibles y otros de origen más renovable, como:

4) Residuos sólidos urbanos: los residuos que se queman en incineradoras se aprovechan para generar energía eléctrica al mismo tiempo.
5) Biomasa: restos de poda o de limpieza de bosques y jardines.
6) Biogás: gas obtenido de la fermentación anaerobia de la materia orgánica de los residuos orgánicos o los purines.

Fermentación anaerobia

La fermentación o digestión anaerobia de la materia orgánica es un proceso por el que ciertas bacterias degradan la materia orgánica en ausencia de oxígeno. Como resultado de esta descomposición se obtiene una mezcla gaseosa formada por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2) que tiene propiedades combustibles y se denomina biogás.

En función del tipo de combustible que tengamos, el proceso de combustión se llevará a cabo con una tecnología u otra. En algunos casos será necesario preparar el combustible, como en algunas centrales térmicas de carbón que realizan el denominado proceso de gasificación o licuación del carbón, por el que aquél se convierte en estado gaseoso o líquido. En cualquier caso, estas tecnologías quedan fuera del alcance del presente módulo.

Como idea principal, es importante saber que las centrales térmicas pueden funcionar con diferentes combustibles, solos o combinados, y que en algunos casos se llevará a cabo una preparación previa de la mezcla para optimizar el rendimiento del proceso de combustión de la central.

Otro aspecto importante, y del que quizá habéis oído hablar, es el impacto ambiental que implica la quema de estos combustibles. En algunos casos podéis haber oído, sobre todo por parte de los promotores de las centrales alimentadas con gas natural, que éste es un combustible limpio. ¿Por qué lo dicen?

La quema de combustibles fósiles emite contaminantes en el entorno, con los humos de las chimeneas (partículas en suspensión, azufre y óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno, dióxido de carbono, etc.). Pero entre los diferentes tipos de combustibles fósiles que existen, no todos emiten la misma cantidad de contaminantes en su combustión. El carbón es el combustible más contaminante y, por ello, poco a poco, se intenta emplearlo menos (por el contrario, es uno de los pocos recursos fósiles locales que tenemos). En el caso del gas natural, en cambio, no se emiten partículas en suspensión y los óxidos de azufre se emiten con una concentración más baja. Sin embargo, todavía pueden existir óxidos de nitrógeno y, sin duda, al tratarse de combustible fósil, éstos implicarán la emisión de gases de efecto invernadero.

4.2.2. Ciclo termodinámico

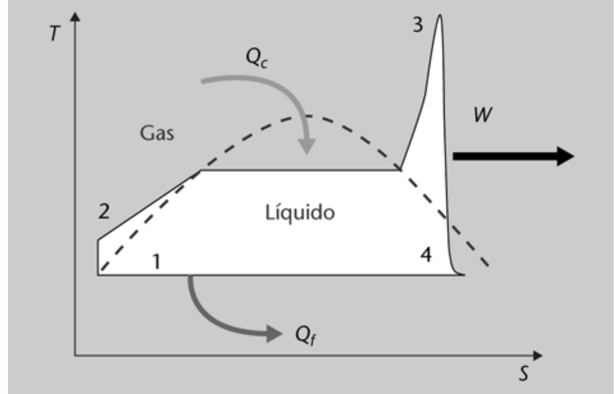
Existen dos procesos o ciclos termodinámicos asociados a las centrales térmicas: el ciclo de Rankine y el ciclo de Brayton.

1) El ciclo de Rankine está asociado al vapor. Representado en un diagrama de temperatura-entropía en la figura 24, consta de cuatro etapas diferenciadas:

El diagrama de temperatura-entropía se analiza en el subapartado 2.3.1 de este módulo didáctico.

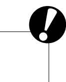
- Etapa 1 (de 2 a 3). En la caldera, a partir del calor de combustión (Q_c), se genera vapor a alta presión.
- Etapa 2 (de 3 a 4). El vapor generado se expande en la turbina (o turbinas, puede haber más de una) y produce con esta expansión un trabajo mecánico (W) que un alternador, acoplado en la turbina, convierte en energía eléctrica.
- Etapa 3 (de 4 a 1). El vapor, una vez ha efectuado el trabajo y se ha expandido, es condensado y así cede calor (Q_f) a un foco frío mediante un intercambiador (que es un elemento que permite el traspaso de calor de un fluido a otro sin mezclarlos). El foco frío puede ser agua, un lago o el aire.
- Etapa 4 (de 1 a 2). El agua condensada se bombea de nuevo hacia la caldera.

Figura 24. Diagrama de temperatura-entropía (*T-S*) del ciclo de Rankine ideal



La línea discontinua representa el cambio de estado del agua.

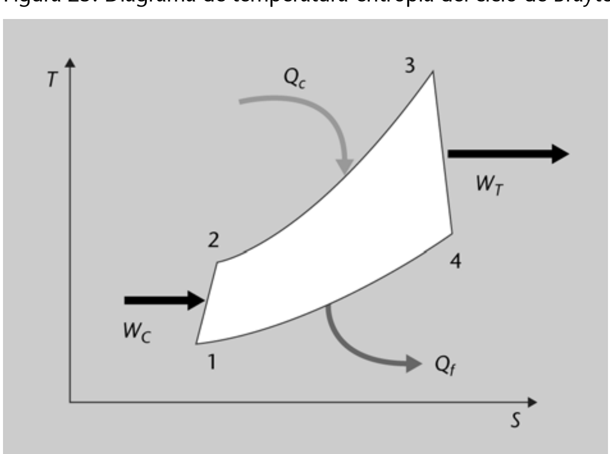
2) El ciclo de Brayton, asociado al gas, se lleva a cabo de manera similar, también en cuatro etapas, y lo podemos ver representado en el diagrama de la figura 25:



Los diagramas *T-S* se tratan en el subapartado 2.3.1 de este módulo didáctico.

- Etapa 1 (de 1 a 2). El gas que se empleará para la combustión se comprime con un compresor, que aporta trabajo al sistema. En este proceso de compresión, el aire aumenta su temperatura.
- Etapa 2 (de 2 a 3). El aire comprimido se calienta con el calor de la combustión.
- Etapa 3 (de 3 a 4). El aire se expande en una turbina de gas y, en esta expansión, parte de la energía térmica se convierte en trabajo mecánico de giro del eje de la turbina. Esta turbina puede tener en el mismo eje, acoplados, el generador (que será el que convertirá el movimiento en electricidad) y el compresor de entrada de la etapa 1.
- Etapa 4 (de 4 a 1). En este caso, el calor que queda en el aire se emite en los humos de combustión y se toma aire nuevo para la etapa de entrada.

Figura 25. Diagrama de temperatura-entropía del ciclo de Brayton



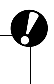
Como resumen, lo que debe quedar claro es que, en los ciclos termodinámicos que se llevan a cabo en las centrales termoeléctricas, el calor obtenido en el proceso de combustión se transforma en trabajo mecánico, que se transforma en energía eléctrica mediante un alternador.

Otro aspecto que debemos remarcar es la liberación de Q_f (el calor extraído del sistema) de los ciclos termodinámicos. El calor que tienen el vapor o el gas, una vez turbinados, se debe extraer del fluido para optimizar el rendimiento del ciclo.

En el caso del ciclo de Brayton, este calor se libera con los humos de combustión de la chimenea. En el caso del ciclo de vapor, dado que es un ciclo cerrado (se hace circular la misma agua una vez y otra), hay que tener un transformador externo que saque el calor. Es decir, deberemos pasar el calor que tenemos en el agua a otro fluido. Éste podrá ser el agua de un río, de un lago o del mar o, en un caso extremo, del aire. Esto provoca que este tipo de centrales siempre estén cerca de algún curso o masa de agua que les permite extraer este calor del ciclo.

4.2.3. Central térmica convencional

La central térmica o termoeléctrica convencional es la que lleva a cabo un ciclo de Rankine (vapor) o un ciclo de Brayton (gas), en función del tipo de combustible que se posea y de la tecnología implantada en el proceso.



Los diferentes tipos de sistemas termodinámicos se definen en el subapartado 2.1.3 de este módulo didáctico.

En ambos casos, el rendimiento global de este tipo de centrales térmicas, ya sea con ciclo de gas o con ciclo de vapor, está alrededor del 30-35% global (desde la combustión a la generación eléctrica). Se trata de una tecnología muy usada, pero que globalmente tiene un rendimiento bajo.

Central térmica con ciclo de vapor

Comencemos por las centrales térmicas que tienen un circuito de Rankine o de vapor. Como hemos comentado en el apartado 4.2.2, estas centrales disponen de un circuito cerrado de agua. Esta agua está debidamente tratada (descalcificada, etc.) para que sea adecuada para el proceso y no provoque averías en los elementos que forman el sistema.

Como elementos clave de esta central, y siempre asociados a una de las partes del ciclo termodinámico que hemos visto en el subapartado 4.2.2, tenemos los siguientes (podéis ver la figura 26):

a) La caldera es el elemento en el que se produce la combustión del combustible y al mismo tiempo la transferencia o el intercambio de este calor al agua del circuito. Existen diferentes tecnologías patentadas, en función del tipo de combustible que utilizan y del intercambiador de calor.

b) La turbina de vapor será adecuada a las presiones de trabajo y es la que transforma la temperatura y la presión del vapor de agua en trabajo mecánico de giro del eje de la turbina.

c) El generador eléctrico transforma el movimiento de giro del eje de la turbina en electricidad. Existen diferentes tipos de generadores, en función de la velocidad de giro, la potencia, etc.

d) El condensador se encarga de convertir el vapor de agua de nuevo en agua líquida. El calor que extrae el condensador lo debe absorber el ambiente próximo a la central: el agua o el aire. Si es agua, se tendrá un circuito abierto (entra y sale agua del río o lago) de cambio. En el caso del aire, puede haber torres de refrigeración o intercambiadores de aire que impliquen la ocupación de más superficie.

Torres de refrigeración

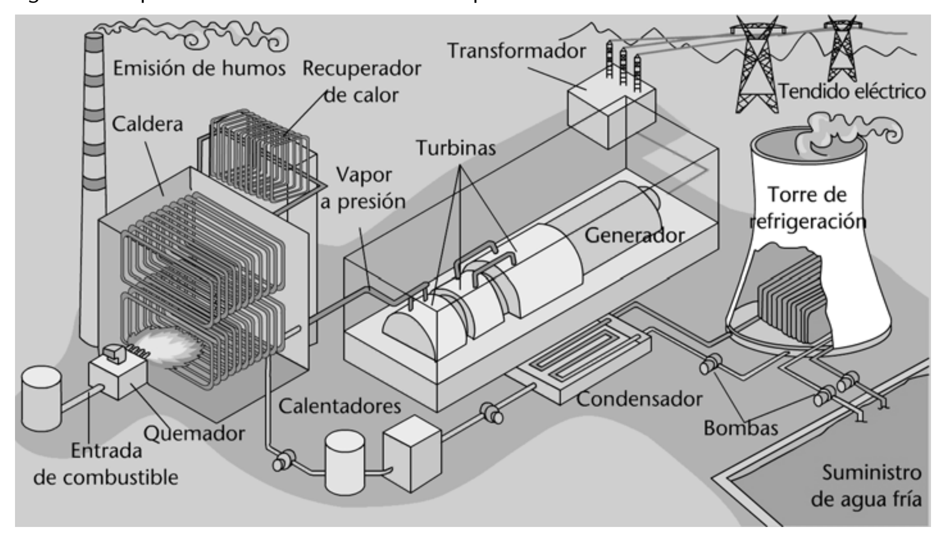
Las torres de refrigeración son las torres más grandes que veremos en las centrales térmicas o nucleares. Pese a su magnitud, el único componente que emiten es vapor de agua. Los humos siempre salen por unas chimeneas más estrechas y altas.

e) Un sistema de tratamiento de humos y una chimenea: los humos de la combustión deberán tratarse, en mayor o menor medida, en función del combustible que tengamos, para cumplir con los límites de emisión de contaminantes que imponen las normativas europeas, estatales y locales. En algunos

casos, los sistemas de tratamiento son aparatos de grandes dimensiones para tener unos rendimientos buenos.

f) Un sistema de preparación e inyección de combustible: en algunos casos tendremos un sistema que preparará el combustible que utilizamos, previa entrada a la caldera, como por ejemplo la gasificación del carbón. En otros casos, como en las centrales de gas, los tratamientos de preparación son mínimos.

Figura 26. Esquema de una central térmica de vapor



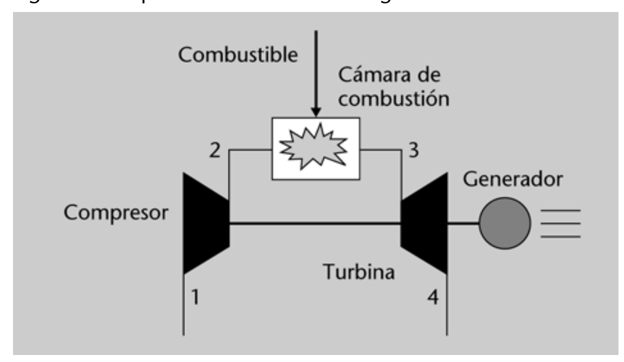
Central térmica con ciclo de gas

Otras centrales térmicas, alimentadas con gas o gasóleo, pueden llevar a cabo un ciclo de Brayton o de gas. En este caso, como hemos comentado en el apartado 4.2.2, el gas que genera el ciclo es el aire que se mezcla posteriormente con el combustible, en la entrada, y los humos de combustión que se obtienen de la caldera, en la parte final del ciclo. Así, son los humos de combustión los que pasan por la turbina de gas.

En el caso del ciclo de Brayton, los componentes son los siguientes:

a) La turbina de gas: hay diferentes tipos de turbinas patentadas. Un ejemplo de turbina es la del conjunto de compresor, cámara de combustión y turbina a la vez. Es un conjunto como el que se muestra esquemáticamente en la figura 27.

Figura 27. Esquema de una turbina de gas



b) Un generador acoplado en el eje de la turbina, como en el caso de las centrales con ciclo de Rankine.

c) Un sistema de preparación e inyección del combustible, como en el caso del ciclo de Rankine.

En este caso, dado que es un ciclo abierto, tal y como hemos descrito en el subapartado 2.1.3, no tendremos transformador de calor ni condensador. El calor se evacua directamente al medio mediante los humos. Sí que se dispone de un sistema de intercambiador aire-aire, en el que el aire de combustión, una vez turbinado pero aún caliente, precalienta el aire exterior antes de pasarlo por el proceso de compresión.

4.2.4. Central térmica de ciclo combinado: turbina de gas con turbina de vapor

Dentro del grupo de las centrales termoeléctricas, es decir, que convierten calor en electricidad, se encuentran las centrales de ciclo combinado.

Una central de ciclo combinado consiste en una central termoeléctrica que combina los dos ciclos termodinámicos que hemos visto: el ciclo de Rankine con turbina de vapor y el ciclo de Brayton con turbina de gas.

Concretamente, en una primera fase se realiza el ciclo de Brayton: se quema el gas y se turbinan los humos de combustión. Éstos, una vez que se les ha extraído la energía mediante la turbina de gas, aún tienen una temperatura muy alta y se aprovechan (en algunos casos con un recalentamiento intermedio) para producir el vapor de un ciclo de Rankine. De este modo, el calor se recupera y se turbina de nuevo el vapor generado.

La propiedad especial de estas centrales termoeléctricas de ciclo combinado es que, al combinar los dos ciclos y aprovechar el calor residual del ciclo de la turbina de gas para producir el vapor, se mejora mucho el rendimiento. Así, para estas centrales de ciclo combinado, tendremos un rendimiento total de generación alrededor del 52%. Si tenemos en cuenta que una térmica convencional está alrededor del 30%, observamos que esta tecnología casi duplica el rendimiento. Se trata, pues, de una buena mejora tecnológica que permite incrementar el rendimiento medio del sistema eléctrico: aprovecha en mayor medida los recursos disponibles que se utilizan en la combustión y llega a una conversión del 50% de la energía del combustible en energía eléctrica.

Los elementos que forman una central de ciclo combinado son el conjunto de sistemas que formaban la térmicas convencionales, descritas en el subaparta-

do 4.2.3, que son los que se describen a continuación y que podéis ver en la figura 28:

a) La turbina de gas, formada por el conjunto de compresor, turbina y cámara de combustión, acoplados en un mismo eje.

b) La turbina de vapor, encargada de la conversión del vapor generado en movimiento del eje.

c) La caldera recuperadora de calor: en este caso, en lugar de tener una caldera de combustión que genera vapor a partir de la combustión, tenemos una caldera que en primer lugar aprovecha el calor de los humos de la turbina de gas y, en el caso de que sea necesario, aporta calor adicional, con combustión, para la generación del vapor. Si se lleva a cabo esta combustión de apoyo para generar vapor, se habla de poscombustión.

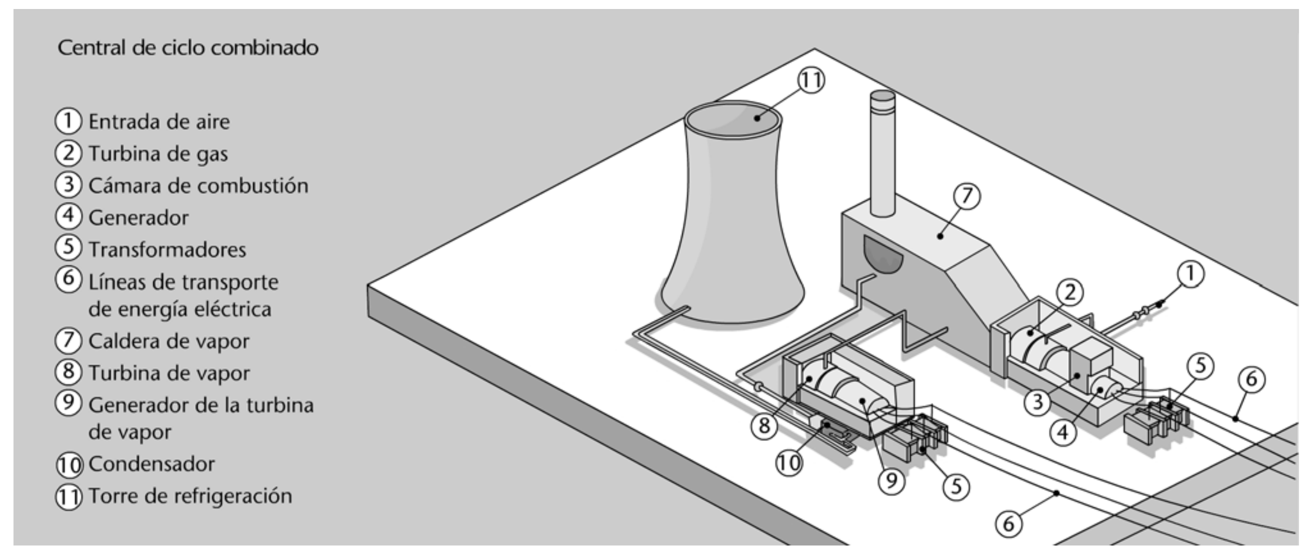
d) Uno o más alternadores que se encargan de convertir el movimiento del eje generado por las turbinas en energía eléctrica.

e) Un condensador, encargado de enfriar el vapor una vez que se ha turbinado, para que vuelva a comenzar el ciclo termodinámico con bastante rendimiento.

f) Un sistema de preparación e inyección de combustible, conectado a la cámara de combustión de la turbina de gas y a la caldera recuperadora de calor, que puede necesitar combustible para la generación de vapor.

Hay muchas configuraciones posibles para las plantas de este tipo, en función del número de ejes, alternadores, turbinas de vapor, etc., que existan. En la mayoría de los casos, las centrales de ciclo combinado se construyen a partir de conjuntos patentados. Se trata de centrales compactas que tienen una apariencia externa muy similar que permite reconocerlas fácilmente. La figura 28, precisamente, es un ejemplo de ello.

Figura 28. Esquema de una central de ciclo combinado



4.3. Central nuclear

Las centrales nucleares, aunque pueda parecer que tienen una tecnología muy diferente del resto de las centrales eléctricas, son en realidad centrales térmicas nucleares.

Es decir, una central nuclear es exactamente igual que una central térmica con ciclo de Rankine o turbina de vapor, pero en lugar de tener una caldera que genera vapor a partir del calor de combustión de un combustible fósil, obtiene el calor del proceso de fisión del átomo de uranio.

Así, una central nuclear no es una especie de central en la que la fisión del uranio genera directamente electricidad, sino que el uranio es la fuente de calor que ayuda a generar el vapor. Este vapor, igual que en las centrales termoeléctricas convencionales, pasa por un ciclo de turbina de vapor y genera electricidad a partir de un alternador.

En este apartado describiremos genéricamente esta tecnología para tener una idea básica de cómo funcionan estas centrales. En el último apartado reflexionaremos sobre el impacto ambiental asociado a estas centrales térmicas y si pueden ser una alternativa real a la lucha contra el cambio climático.

4.3.1. Combustible: del uranio a los elementos combustibles

Una central nuclear obtiene el calor necesario para llevar a cabo el ciclo de Rankine a partir de la reacción nuclear del uranio.

El uranio es un elemento no demasiado abundante en la naturaleza. Se extrae en minería y el Congo es uno de los países con más reservas. Una vez extraído, este uranio no sirve directamente como combustible, sino que se debe procesar, mediante un proceso de enriquecimiento del uranio. El proceso de enriquecimiento del uranio que se consume en las centrales europeas se lleva a cabo en Francia.

El proceso de enriquecimiento es necesario para obtener buenos rendimientos de la generación de fisión. El uranio está presente en la naturaleza en las formas conocidas como isótopos ^{238}U y ^{235}U (uranio 238 y uranio 235, respectivamente). De forma natural, la presencia de este segundo isótopo es de un 0,7%, y en la barras de combustible, que son el producto del enriquecimiento del uranio, es de un 4-5%.

Este isótopo se combina con óxido de uranio (UO_2), un material de tipo cerámico que se utiliza en forma de pastillas, de un diámetro aproximado de un centímetro. Estas pastillas se introducen en unas vainas elaboradas con una aleación de circonio, con un diámetro de 4 cm y de 4 m de longitud. Una vez

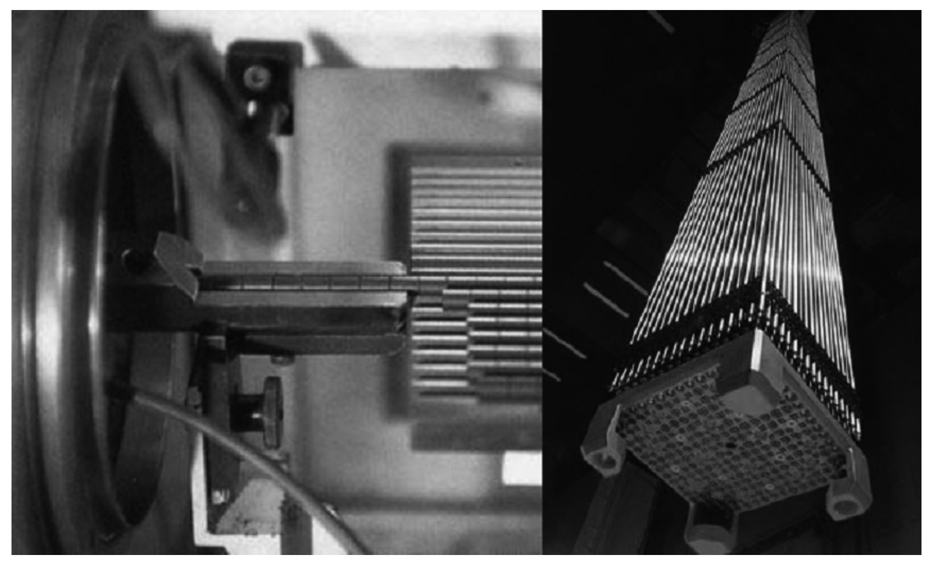
Isótopos

Los isótopos de un elemento químico son átomos que tienen el mismo número atómico (es decir, el mismo número de protones) y diferente número másico (es decir, diferente número de neutrones). Las propiedades químicas de los isótopos de un mismo elemento son las mismas, pero las propiedades físicas pueden ser completamente diferentes. Por ejemplo, los isótopos con una relación entre protones y neutrones que no sea adecuada para la estabilidad serán inestables, es decir, radioactivos.

que se ha preparado esta barra, se agrupan en ella unas cuantas pastillas y se forma lo que se conoce como elemento combustible.

Este elemento combustible, del que se adjunta una imagen en la figura 29, es el que se emplea en las centrales térmicas nucleares para recoger el calor generado durante la fisión del uranio.

Figura 29. Detalle de las pastillas de UO_2 y de un elemento de combustible de una central nuclear



Fuente: Departamento de Física de la UPC. Módulos ambientales

Estos elementos combustibles también se disponen en el reactor de la central nuclear. La energía liberada por la reacción de fisión está formada por la energía cinética de los fragmentos de la fisión del uranio (núcleos de otros elementos, con propiedades radioactivas). Esta energía cinética se transfiere en forma de energía calorífica a las pastillas cerámicas de los elementos combustibles, que, a su vez, transmiten este calor a la parte exterior de las vainas, a la zona del circonio.

Para extraer este calor generado por la fisión del uranio se hace circular agua a presión a través de las vainas, que se lleva el calor liberado y aumenta así su temperatura. Una vez tenemos este agua caliente, se lleva a cabo el ciclo de Rankine de vapor, igual que en las centrales térmicas descritas en el subapartado 4.2.3.

Energía de fisión

La energía de fisión es una energía que se libera al dividirse un núcleo atómico de uranio en otros productos, siempre radioactivos.

Cabe destacar que el calor generado por la reacción nuclear del uranio es mucho mayor que el generado en una combustión. Para que os hagáis una idea, 453 g de uranio producen el mismo calor que 1.500 toneladas de carbón. Si lo pasamos a las mismas unidades, tenemos que ¡453 g de uranio equivalen a 1.500.000.000 g de carbón! Es decir, el poder calorífico del uranio es más de tres millones de veces superior al del carbón en términos de masa.

Al cabo de un tiempo de llevar a cabo reacciones nucleares, los elementos de combustible se renuevan, lo que implica sustituir algunas barras de circonio.

Las barras o elementos combustibles que ya no son aptas para calentar agua se retiran. Actualmente, estos elementos consumidos se mantienen almacenados en el interior de las propias centrales nucleares.

4.3.2. Ciclo termodinámico

Como hemos comentado ya desde el comienzo de este apartado, el ciclo termodinámico que se realiza en una central nuclear es el ciclo de Rankine, de turbina de vapor, que hemos descrito anteriormente en el subapartado 4.2.2. La única diferencia es que no hay una caldera de vapor que genere vapor a partir de la combustión, sino que el calor se obtiene haciendo pasar agua a presión a través de los elementos combustibles.

A causa del sistema de extracción de la energía calorífica de los elementos combustibles, haciendo pasar agua a través de éstos, las temperaturas de trabajo del agua no son tan altas como en el caso de las centrales térmicas de combustión. El hecho de tener temperaturas de trabajo más bajas provoca que obtengamos un rendimiento más bajo en el ciclo de Rankine.

No obstante, dado que no hay pérdidas de calor por los humos de la chimenea (que sí que se dan en las centrales de combustión), se acaban obteniendo unos rendimientos globales de la central de entre el 30 y el 40%, similares a los de las centrales térmicas de combustión, pero lejos de los rendimientos de las centrales de ciclo combinado.

4.3.3. Impacto ambiental asociado

El impacto ambiental de una central nuclear puede ser:

1) **Impacto térmico**. Al igual que las centrales térmicas convencionales de ciclo de Rankine, estas centrales necesitan masas de agua o de otros elementos para refrigerar el agua del circuito. Si, como hemos dicho, el rendimiento es del 30-40%, tenemos que por cada unidad de energía eléctrica generada deberemos emitir al ambiente, en forma de calor, dos. Por ello, las centrales nucleares se sitúan próximas a los ríos o al mar. Además, también suelen tener torres de refrigeración de vapor de agua, ya descritas en el subapartado 4.2.3.

2) **Impacto radiológico**. Éste es, sin duda, el gran aspecto negativo de este tipo de centrales. Aunque la cantidad de combustible utilizado es muy inferior a la de las térmicas de combustión, una vez agotado el combustible se convierte en residuo. Pese a la poca cantidad generada, este residuo tiene una actividad radioactiva que se puede mantener ¡durante millones de años! Aparte de estos residuos, también se pueden emitir elementos radioactivos a través del agua o de las chimeneas de refrigeración, aunque éste es un aspecto que en las

centrales europeas se controla muchísimo, con controles muy exhaustivos en las proximidades de las centrales, para detectar la posible acumulación de isótopos radioactivos.

Debéis tener presente que la radioactividad no es un efecto exclusivo de las centrales nucleares y de la reacción de fisión: la radioactividad existe también en ciertas zonas de la naturaleza. Esta radioactividad se denomina *radioactividad natural*. Por ello, a la radioactividad de las centrales nucleares, para diferenciarla, la denominamos radioactividad artificial.

En estos controles de radioactividad que se realizan alrededor de las centrales se ha visto que la radioactividad natural es mayor que la artificial generada por las centrales nucleares que existen en el territorio. Un dato no tan bueno es que la radioactividad artificial que se detecta en estos estudios proviene principalmente de la explosión nuclear de Chernóbil.

Accidente de Chernóbil

El accidente de Chernóbil fue un accidente nuclear, considerado el más grave de la historia, que se produjo en Chernóbil (Ucrania, entonces parte de la Unión Soviética) el sábado 26 de abril de 1986. Aquel día se produjo una explosión debido al sobrecalentamiento del hidrógeno acumulado dentro del núcleo, durante una prueba en la que se simulaba un corte de suministro eléctrico.

Debido a la falta de un edificio de contención en la central nuclear, una nube de lluvia radioactiva se dispersó por zonas del occidente de la Unión Soviética, Europa oriental, Escandinavia, el Reino Unido y el este de Estados Unidos. Grandes áreas de Ucrania, Bielorrusia y Rusia resultaron gravemente contaminadas, lo que provocó la evacuación y el reasentamiento de unas 300.000 personas. Un 60% de la lluvia radioactiva cayó sobre Bielorrusia.

Las centrales nucleares no implican la emisión de gases de efecto invernadero y, por ello, muchas veces se proponen como posible alternativa de generación eléctrica para cumplir con el Protocolo de Kyoto y las reducciones de emisiones de gases de efecto invernadero que este protocolo nos impone.

Protocolo de Kyoto

El protocolo de Kyoto es un convenio internacional para la prevención del cambio climático, bajo el auspicio de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) dentro de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). El protocolo de Kyoto tiene como objetivo que los países industrializados reduzcan sus emisiones hasta un 8% por debajo del volumen de 1990, sin poner restricciones a los países que están en vías de desarrollo (como es el caso de China, la India o Brasil). El acuerdo pasó a ser de obligado cumplimiento cuando Rusia lo ratificó el 16 de febrero del 2005, ya que era necesario que como mínimo lo ratificasen los países industrializados responsables de al menos un 55% de las emisiones de CO_2. Por su parte, el Gobierno de Estados Unidos se niega a ratificar el protocolo.

Si bien es completamente cierto que no se emiten gases de efecto invernadero, es necesario tener presente que la radioactividad es un impacto muy significativo. Si todos los residuos están bien gestionados y controlados, como las centrales nucleares actuales, no hay ningún problema. Ahora bien, en el territorio español no hay actualmente ninguna instalación para la gestión de residuos radioactivos de alta actividad (podéis ver el subapartado 3.1.6). La mayoría de

elementos combustibles agotados de España se almacenan en las propias centrales nucleares y una pequeña parte, en instalaciones en Francia, que cobra un alquiler por el mantenimiento de las instalaciones.

Por lo tanto, habrá que ver cómo se gestionan estos residuos. El gran problema que tendrán estas instalaciones es que deberán servir ¡durante millones de años! La magnitud temporal de estos residuos no es, pues, despreciable. Además, el uranio también es un elemento que se encuentra en cantidades finitas en la Tierra, por lo que no es una energía renovable ni inagotable.

4.4. ¿Qué hemos aprendido?

- Hemos conocido cómo funciona por dentro una central térmica (de gas, fuel, petróleo, carbón o nuclear) y los ciclos termodinámicos que se llevan a cabo en ésta, que son el ciclo de vapor o ciclo de Rankine y el ciclo de gas o ciclo de Brayton.

- También hemos visto que una central nuclear utiliza, en el fondo, el mismo ciclo que las centrales térmicas de combustibles fósiles, y que lo único que las diferencia es el combustible y la manera de obtener calor. Asimismo, hemos detallado los impactos ambientales de esta tecnología.

Hasta aquí hemos visto el funcionamiento de las tecnologías convencionales y el impacto ambiental asociado. Las alternativas actuales de electrificación pasan por el uso de las energías renovables. Ahora, pues, continuaremos con el funcionamiento y las peculiaridades de las plantas de energía renovable para la producción de energía eléctrica, concretamente la energía eólica y la energía solar fotovoltaica.

5. Energías eólica y fotovoltaica

Hasta ahora hemos descrito detalladamente lo que podríamos denominar sistemas convencionales de generación de electricidad. Si bien actualmente son los mayoritarios en cuanto a generación y potencia instalada, implican, como hemos visto, problemas ambientales, ya que provienen de fondos de generación no renovable y son contaminantes.

En este apartado os describiremos qué es una fuente de energía renovable (aunque seguramente todos tenéis una idea de lo que es y a grandes rasgos os la hemos descrito en el subapartado 3.1.6) y cómo se cuantifican los recursos que utilizan. Después describiremos los sistemas de aprovechamiento de la energía eólica y los de aprovechamiento de la energía solar fotovoltaica, que transforman el viento y la radiación solar, respectivamente, en energía eléctrica.

¿Qué aprenderemos?

- Veremos con detalle qué se considera una fuente de energía renovable;
- expondremos la importancia de la valoración de los recursos renovables en el lugar en el que queramos construir una planta eléctrica eólica o fotovoltaica;
- veremos cómo se valoran el recurso viento y el recurso radiación solar;
- conoceremos uno de los problemas de las energías renovables: la dificultad de regulación;
- introduciremos los diferentes elementos que forman un parque eólico, desde los aerogeneradores a los otros elementos auxiliares;
- veremos el impacto, positivo y negativo, de la implantación de la energía eólica;
- presentaremos los diferentes tipos de plantas de aprovechamiento de la energía solar y veremos las opciones que tenemos para implantar la energía fotovoltaica, y
- analizaremos las ayudas que ofrece actualmente el Gobierno para fomentar el desarrollo de las energías renovables.

¿Qué supondremos?

Supondremos que tenéis claras las fórmulas de cálculo de áreas circulares; los factores de conversión de unidades, sobre todo de las unidades de energía, y las operaciones básicas de la solución de problemas mediante la resolución de ecuaciones de una variable.

5.1. ¿Qué es una fuente de energía renovable?

Una **fuente de energía renovable** es aquella que, al consumirla, no condiciona su disposición futura.

En el caso de los combustibles fósiles, éstos se formaron en un período muy concreto de la evolución de la Tierra y existen en una cantidad finita. El consumo de estos recursos fósiles no es, por lo tanto, renovable; cada barril de petróleo que consumimos no se recupera, o se recupera a una velocidad tan lenta que se considera que no se recupera.

No obstante, existen otras fuentes energéticas, concretamente los saltos de agua, la radiación solar o el viento, cuyo uso no implica el agotamiento del recurso. En este caso hablamos de recursos renovables.

5.2. Estudio de los recursos renovables

La primera diferencia notable de las instalaciones basadas en energías renovables respecto a las que no lo son es que las primeras se deben ubicar en emplazamientos en los que hay disponibilidad y calidad del recurso renovable que utilizan. Respecto a las centrales térmicas o nucleares que hemos visto en el apartado 4, el emplazamiento está más condicionado por la necesidad de refrigeración que por la disponibilidad del recurso consumido (petróleo, barras de combustible nuclear, etc.), que se puede transportar fácilmente hasta el emplazamiento de la central. El viento o la radiación solar no se pueden concentrar, acumular ni transportar, y por tanto habrá que calcular la disponibilidad del recurso renovable en cada emplazamiento.

Así, las centrales térmicas, excepto algunas de carbón que se abastecen directamente de una mina próxima, se emplazan en ubicaciones en las que hay una buena comunicación y el abastecimiento de combustible tiene un coste razonable, o en los puntos en los que la red eléctrica es apta para la conexión de la central. Por lo tanto, habrá otros criterios de selección del emplazamiento que podrán tener igual o más importancia que la disponibilidad de combustible: la red eléctrica, la necesidad de una masa de agua que ayude a evacuar el calor generado en el proceso, etc.

En el caso de las energías renovables, el primer factor, en muchos casos determinante, será la disponibilidad del recurso. Si tenemos una buena zona, ventosa o soleada, generaremos más energía y ello nos determinará la rentabilidad económica de la instalación. Por lo tanto, la disponibilidad del recurso renovable condicionará directamente la viabilidad económica de la instalación.

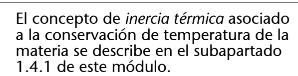
Veamos, pues, para el caso de la energía eólica y de la energía solar, cómo se determina la disponibilidad del recurso renovable, siempre con la instalación previa de una planta de generación eléctrica.

5.2.1. Viento

El viento es un movimiento del aire provocado por diferencias de presiones atmosféricas o diferencias de temperatura.

El viento se origina globalmente por la variación de la presión atmosférica, pero localmente se genera por las características geográficas y térmicas del aire. Los elementos que influyen en la generación del viento son:

1) Localmente, en las zonas de costa hay un régimen de vientos y estas brisas son muy conocidas por la población local. Durante el día, con la radiación solar, la tierra alcanza una temperatura superior a la de la superficie del mar. De esta manera se crea una corriente de aire de mar a tierra. Cuando el sol se pone, la tierra se enfría más que el mar, ya que la masa de agua tiene más inercia térmica y conserva mejor la temperatura. Se invierte, por lo tanto, la diferencia de temperaturas y, como consecuencia, también la dirección del viento. Por la noche irá desde la tierra hacia el mar. En los valles se produce un efecto similar, ya que no se calientan igual las laderas de las montañas que el fondo del valle.


El concepto de *inercia térmica* asociado a la conservación de temperatura de la materia se describe en el subapartado 1.4.1 de este módulo.

2) En conjunto existen tres elementos que afectan a la generación del viento:

- el movimiento de las masas de aire generadas por la forma de la Tierra y la radiación incidente;
- la rotación de la Tierra, que provoca que los movimientos anteriores tiendan a girar hacia la derecha, y
- los vientos de tipo estacional que afectan a cada zona de los diferentes continentes.

Por ejemplo, en la figura 30 vemos los valores del *Atlas eólico europeo* para los 50 m de altura.

Para valorar los vientos correctamente, deberemos hacer una evolución de escala: comenzaremos por la escala global, pasaremos a la regional y finalmente a la local. Cada una afecta a diferentes aspectos relativos a la ubicación de los parques.

Selección de parques eólicos

Un aspecto que se puede tener en cuenta a la hora de seleccionar un lugar ventoso son ciertas características que se dan en estos emplazamientos, como:

- la toponimia del lugar: si una cordillera o una montaña se llama Pico ventoso, El pico de la calma, Campos del huracán, Pico de era ventosa, etc., nos está dando una idea de qué tipo de clima hay en él.
- los árboles: podéis observar que los árboles de las zonas ventosas no crecen rectos, sino que siempre crecen con una cierta inclinación. Esta inclinación se debe a la fuerza del viento.

Si queremos conocer la potencia que podemos extraer del recurso eólico en cada zona del territorio, necesitaremos la curva de distribución de la probabilidad de velocidad del viento en la zona, ya que la potencia que podemos extraer del viento se calcula a partir de la ecuación siguiente:

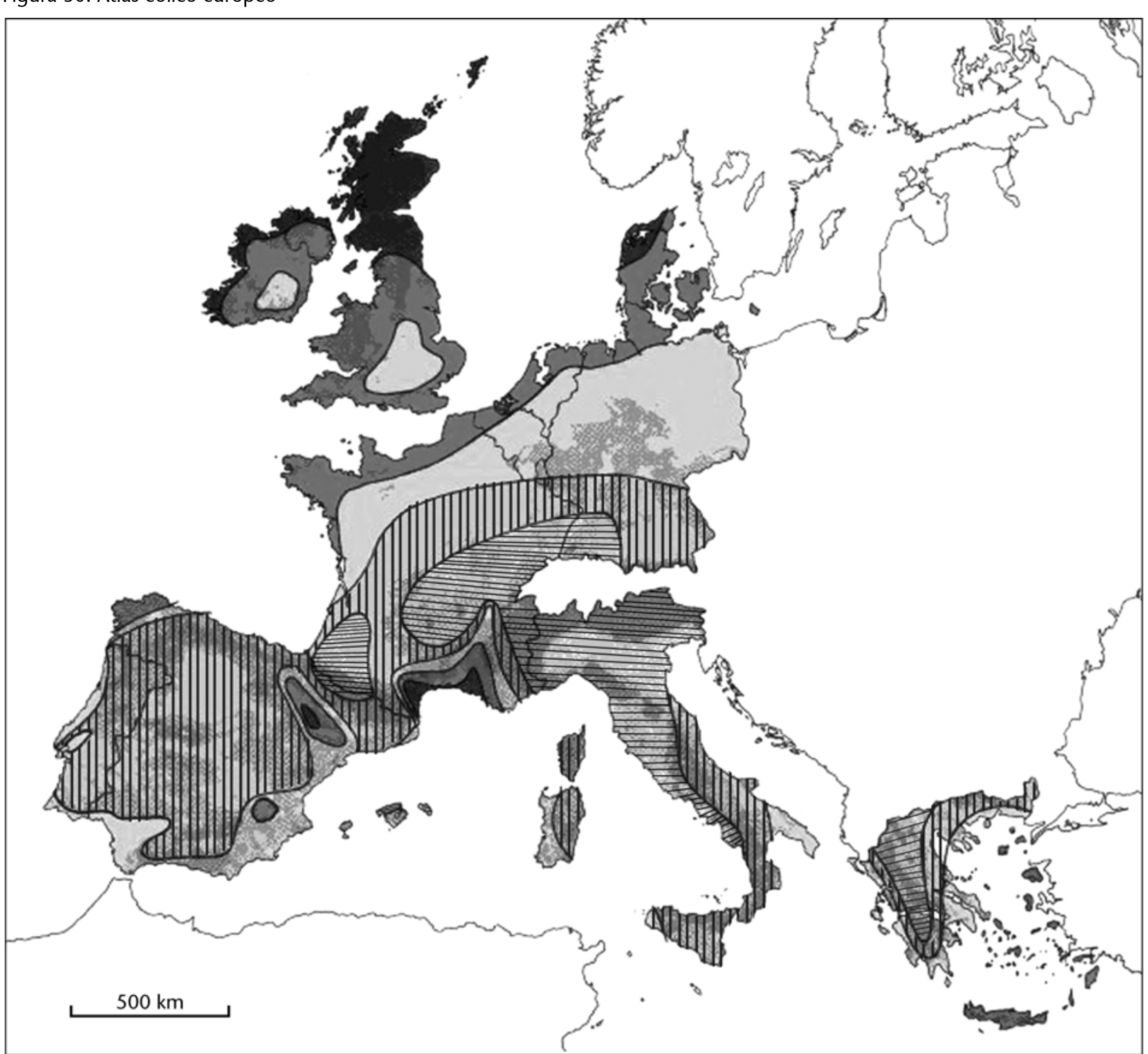
$$P = 1/2\ \rho \cdot A \cdot v^3 \qquad (41)$$

En esta ecuación tenemos que P, la potencia (en W), es igual a la mitad del producto de la (rho), o densidad del aire (en kg/m^3), por el área circular A que barren las palas (en m^2) y por la velocidad v del viento (en m/s).

Palas

Las palas son la parte del aerogenerador que gira con la acción del viento y que describiremos en el apartado 5.3.2. de este módulo.

Figura 30. Atlas eólico europeo



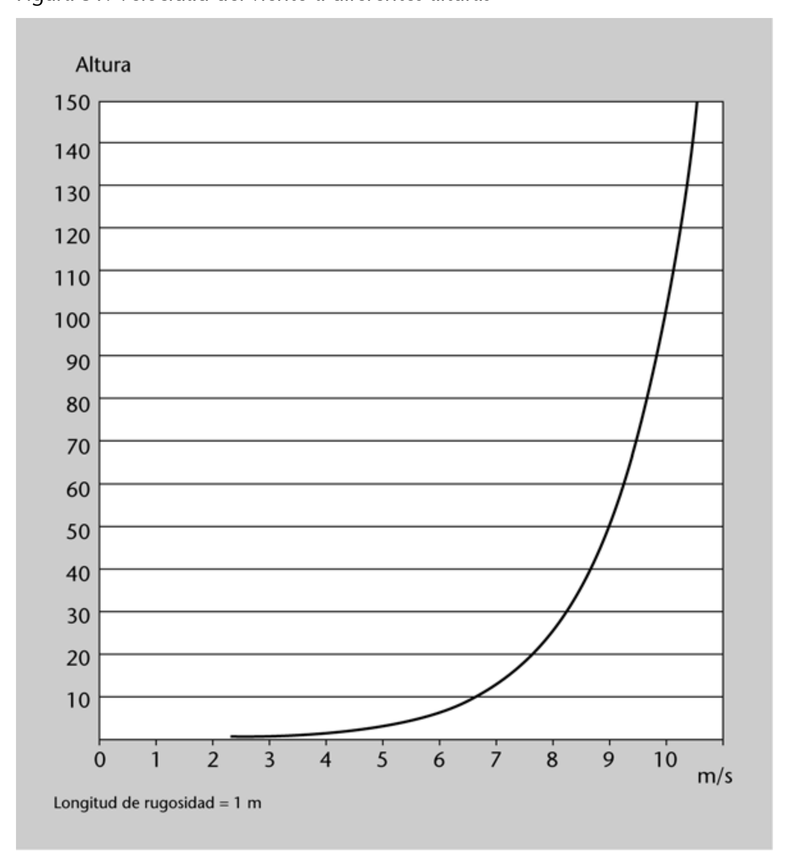
Recursos eólicos a 50 m sobre el nivel del suelo para cinco situaciones topográficas diferentes										
	Terreno allanado		Llanura abierta		Costa marítima		Mar abierto		Cimas y picos	
	m·s^{-1}	W·m^{-2}	m·s^{-1}	W·m^{-2}	m·s^{-1}	W·m^{-2}	m·s^{-1}	W·m^{-2}	m·s^{-1}	W·m^{-2}
	> 0,6	> 250	> 7,5	> 500	> 8,5	> 700	> 9,0	> 800	> 11,5	> 1.800
	5,0-6,0	150-250	6,5-7,5	300-500	7,0-8,5	400-700	8,0-9,0	600-800	10,0-11,5	1.200-1.800
	4,5-5,0	100-150	5,5-6,0	200-300	6,0-7,0	250-400	7,0-8,0	400-600	8,5-10,0	700-1.200
	3,5-4,5	50-100	4,5-5,5	100-200	5,0-6,0	150-250	5,5-7,0	200-400	7,0-8,5	400-700
	< 3,5	< 50	< 4,5	< 100	< 5,0	< 100	< 5,5	< 200	< 7,0	< 400

Fuente: Datos extraídos de Windatlas (www.windatlas.dk)

Lo que vemos en esta ecuación es que la velocidad está elevada al cubo, por lo que es el factor más determinante de la ecuación y, por lo tanto, éste será el que querremos conocer. La correcta evaluación de la velocidad del viento es de gran importancia, ya que es el término que más afecta al resultado. Así, una diferencia del orden del 10% en su valoración significa una diferencia del 30% en la producción obtenida. Estos valores, económicamente, pueden tener un efecto desastroso.

Hasta ahora hemos hablado del viento horizontal. Verticalmente, la distribución del viento también varía por un efecto de cizalla. En la zona próxima a la tierra, la velocidad del viento es cero, y a medida que vamos subiendo, aumenta, hasta que se estabiliza y deja de crecer. En las cordilleras, el incremento de la velocidad del viento con la altura es mucho más acusado, y por ello los aerogeneradores se colocan a menudo en las crestas. Una distribución tipo en función de la altura del viento es la que se muestra en la figura 31.

Figura 31. Velocidad del viento a diferentes alturas



Para concluir cómo se resuelve actualmente la cuantificación y la valoración del recurso eólico de un emplazamiento concreto, debemos señalar que existen paquetes informáticos que, a partir de los datos del viento y la topografía de un emplazamiento determinado, obtienen los parámetros siguientes:

- la velocidad media del viento y la distribución de frecuencias de la velocidad,
- la distribución de frecuencias en las diferentes direcciones (rosa de los vientos),
- la variación del viento con la altura y la posición, y
- la estadística de ráfagas y valores extremos.

Paquetes informáticos

Los paquetes informáticos que permiten obtener valores concretos del viento a partir de los datos genéricos y la topografía del lugar consisten, principalmente, en simulaciones estadísticas y dinámicas del tipo MATLAB, simulación CFD (dinámica de fluidos computacional) o TRNSYS (sistema de cálculo por elementos finitos).

Web de interés

Si queréis conocer con más detalle las características del viento, su origen, los factores determinantes e incluso calcular la rugosidad del terreno, os invitamos a visitar la página web de la Asociación Danesa de la Industria Eólica (www.windpower.org), concretamente la visita guiada por el mundo de la energía eólica, disponible en español en el enlace siguiente:

http://www.talentfactory.dk/es/tour/wres/index.htm

Como idea, se debe señalar que la cuantificación del recurso eólico no es nada fácil. Por lo tanto, hay que tener claro que existe un riesgo importante en cuanto a la construcción y el diseño de los parques eólicos.

5.2.2. Radiación solar

A diferencia del viento, la radiación solar es un término mucho más conocido y tabulado, que nos será fácil de determinar. Por lo tanto, para conocer la disponibilidad de radiación, lo mejor es recurrir a valores de radiación tabulados por mes y hacer una valoración anual total.

Niveles de radiación

Para obtener la radiación anual de un emplazamiento, debéis consultar los organismos oficiales de las administraciones competentes en cada zona. También hay paquetes informáticos disponibles con los valores de radiación completamente tabulados.

Cabe señalar que existe cierta diferencia en los valores de radiación que se obtienen en función de las diferentes fuentes. Si es posible, siempre es conveniente llevar a cabo una doble valoración, sobre todo en el ámbito económico o de cobertura de las necesidades. También se pueden adoptar factores de seguridad para garantizar que la instalación fotovoltaica que construimos sea suficiente para cubrir las demandas.

Aparte de la radiación, veremos que aplicaremos factores correctores a este dato para ajustarlo al máximo. Tendremos como mínimo tres factores correctores:

1) Factor de sombras. En función del emplazamiento, las construcciones de alrededor, los árboles, la topografía del terreno, etc., observaremos que, en determinadas épocas del año, hay menos radiación incidente en nuestro emplazamiento porque los elementos de alrededor proyectan sobre éste sombras durante algunas horas del día. Esto sucede sobre todo a primera y última hora del día, cuando el sol está más bajo y las sombras son más largas. Podemos aplicar este aspecto con un término fijo o lo podemos calcular con paquetes informáticos de simuladores de sombras.

2) Factor de limpieza de la atmósfera. En función del emplazamiento y del entorno, la atmósfera puede estar más o menos limpia. En un lugar de montaña, más alto y sin polución, este factor incrementa la radiación (se multiplica el valor de las tablas por 1,05). Por el contrario, en entornos urbanos en los que haya polvo, contaminación, etc., el rendimiento de la captación de la radiación solar será más bajo, por lo que el valor tabulado se reducirá (se multiplicará por 0,95).

3) Factor de desaprovechamiento de las horas bajas de radiación solar. Los valores tabulados de radiación solar incluyen todos los momentos del día. A la salida y a la puesta del sol, la radiación solar incide muy sesgada sobre la superficie del captador y esta radiación no se aprovecha. A la hora de hacer cálculos, se estima que la radiación que se pierde por esta razón es del 6%. Por lo tanto, multiplicaremos el valor tabulado de la radiación incidente por un factor de 0,94.

Además, en casos concretos, puede haber otros factores correctores o de pérdidas de la radiación.

5.2.3. El problema de la regulación de las energías renovables

Como hemos visto, el viento es un recurso que se debe evaluar con mucho cuidado, ya que hay múltiples factores que influyen sobre él. La radiación solar, en cambio, es un aspecto mucho más conocido y tabulado, por lo que su determinación no suele requerir demasiados estudios previos y simplemente hay que adoptar factores correctores a la hora de realizar los cálculos.

En cualquier caso, tanto para el viento como para la radiación solar, lo que sí que es difícil es saber concretamente, día a día, cuál será la disponibilidad del recurso (viento o sol) y, como consecuencia, cuál será la energía que generaremos. Por otra parte, ¿por qué queremos conocer esto?

Como hemos explicado en el subapartado 3.2, el sistema eléctrico funciona a partir del mercado eléctrico, regulado por el OMEL. En este mercado eléctrico, cada día se determinan la demanda y la generación eléctrica. Esto significa que las plantas eólicas y las fotovoltaicas deben predecir la energía que inyectarán a la red eléctrica cada hora del día, ¡con dos días de antelación! Este aspecto añade, pues, un inconveniente a las energías renovables, ya que, por cada predicción equivocada que se haga en la producción de energía eléctrica, el OMEL penaliza económicamente al productor.

Las centrales fotovoltaicas podrán llevar a cabo con facilidad esta predicción, ya que tienen menos potencia y, por lo tanto, pueden cometer un error menor. En el caso de los parques eólicos, éstos disponen de servicios contratados de predicción del viento que, con modelos de simulación y los datos meteorológicos, ajustan al máximo las predicciones de generación eléctrica.

Sin embargo, con los modelos de previsión meteorológica no es suficiente y, por ejemplo, para un parque eólico de 50 MW de potencia eléctrica se pueden tener errores de previsión del orden del 50%. Lo que sí se ha visto es que, en el conjunto del Estado, si sumamos la potencia de diferentes plantas hasta un total de 9.000 MW, los errores de previsión disminuyen hasta el 5%. Es decir, que al unir diferentes plantas, los errores de unas y otras se compensan y se alcanzan niveles de predicción mejores. En el sector se dice que uniones de parques eólicos, con una potencia conjunta de 500 MW, ayudan a reducir mucho la distorsión.

Web de interés

Un ejemplo de predicción del viento lo encontramos en la web www.theyr.com, en la que se ofrecen modelos de previsión de hasta cuatro días de antelación.

En cualquier caso, lo que sí que habrá que hacer en un futuro, si se quiere que el sistema eléctrico pueda funcionar de manera que ofrezca calidad y fiabilidad con las energías renovables, es construir instalaciones de regulación. Efectivamente, aunque la previsión que hemos realizado del viento o de la radiación

solar sea acertada, lo que se necesita para que funcione el sistema eléctrico es que la energía se genere en el momento en el que se consume. Pero para las energías renovables esto no funciona así; la energía se genera cuando existe el recurso, es decir, cuando hace viento para la planta eólica y cuando es de día y hace sol para las plantas fotovoltaicas. Por lo tanto, es necesario construir instalaciones que ayuden a regular la generación y la demanda y puedan actuar en los momentos en los que éstas no se complementen: cuando se genera y no hay demanda o, al contrario, cuando hay demanda y no se genera.

De hecho, esta idea no es nueva. Las centrales nucleares, que, como hemos mencionado en el subapartado 4.3, no se pueden parar, generan electricidad continuamente, día y noche. Una vez que se comprobó que la construcción de estas centrales podía afectar al sistema eléctrico, paralelamente se construyeron centrales de regulación para bombeo de agua (podéis ver el subapartado 4.1). Es decir, por las noches, cuando sobra energía, bombean agua desde un embalse inferior a otro superior; y de día, cuando hay demanda de energía, turbinan agua del embalse superior al inferior.

En general, este aspecto no afecta a las centrales convencionales, que pueden regular su producción simplemente aumentando o disminuyendo el consumo de combustible. Las centrales no almacenan la energía en acumuladores gigantes porque no se dispone de la tecnología para hacerlo y porque eso significaría más costes económicos y más pérdidas energéticas. Así, lo mejor para las centrales convencionales es producir la energía en el momento de la demanda.

Por tanto, debemos tener claro que si el sistema eléctrico evoluciona en su mayor parte hacia un sistema de energías renovables, con generación en el momento en que se da el recurso y no en el momento en que se produce la demanda de electricidad, será necesario construir centrales de regulación que puedan actuar sobre el mercado eléctrico en los momentos en que la generación y la demanda no coincidan.

5.3. Energía eólica

Una vez que hemos visto cómo funciona la determinación de los recursos eólicos y el aspecto de regulación eléctrica que hay que introducir en las energías renovables, desarrollaremos con más detenimiento la energía eólica en este apartado y la fotovoltaica en el siguiente, el subapartado 5.4.

Como hemos visto en el subapartado 5.1.1, podemos calcular la potencia que hay en el viento a partir de la ecuación 41.

Pero esta potencia contenida en el viento no la podemos aprovechar al 100%, tal y como determina la ley de Betz, formulada por el físico alemán Albert Betz en el año1926.

La **ley de Betz** afirma que sólo podremos convertir menos de 16/27 (aproximadamente el 59%) de la energía cinética del viento en energía mecánica mediante un aerogenerador.

Esto se debe a que el flujo de aire no se puede parar, es decir, una vez el viento pasa a través de un aerogenerador, éste no se queda con velocidad cero, en calma, sino que continúa existiendo. Por lo tanto, aquí hay un primer límite para el aprovechamiento de la energía eólica.

Albert Betz

Albert Betz (Schweinfurt, 1885-Göttingen, 1968) fue un físico alemán pionero en la tecnología de las turbinas eólicas. En el año 1910 se graduó en Ingeniería Naval y en 1911 comenzó a investigar en el Instituto de Aerodinámica de la Universidad de Göttingen. En 1920 publicó la ley de Betz. En su libro *Wind-Energie und ihre Ausnutzung durch Windmühlen* ("Energía eólica y su uso en aerogeneradores"), publicado en 1926, da una buena visión del conocimiento que se tenía de la energía eólica y de los aerogeneradores en aquella época. Su teoría sobre la formación de las alas aún hoy es el fundamento para la construcción de aerogeneradores.

Además, aparte de la ley de Betz, hay que tener en cuenta que tendremos unas pérdidas eléctricas aproximadas del 11% y unas pérdidas mecánicas de más o menos el 6%.

Si sumamos las tres limitaciones (la ley de Betz, las pérdidas eléctricas y las mecánicas), vemos que como máximo podremos extraer un 24% de la potencia del viento, en un momento de máximo rendimiento.

Como valor estimativo, la media del rendimiento de generación eléctrica con la tecnología eólica se sitúa alrededor del 20-22% del recurso eólico disponible. Este rendimiento puede parecer bajo, pero si lo comparamos con las tecnologías de generación de electricidad a partir de combustión, el rendimiento que obteníamos en aquellos casos era del 30%, tal y como hemos detallado en el subapartado 4.2.3, y el resto es calor que debemos evacuar. En el caso de la energía eólica, las pérdidas serán simplemente el viento que sigue su curso.

5.3.1. Criterios para la implantación de la energía eólica

Como criterios generales para la implantación de un parque eólico, habrá que tener en cuenta los cinco aspectos siguientes:

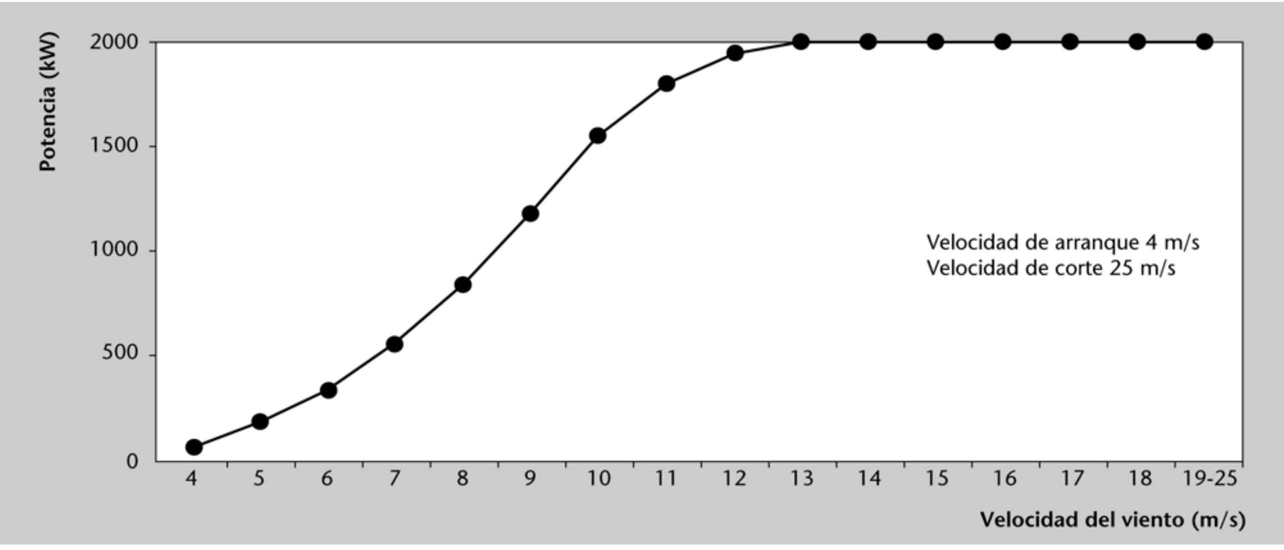
1) Serán necesarias medidas de velocidad del viento en la zona y el recurso eólico disponible deberá ser suficiente para rentabilizar la generación de electricidad. Lo valoraremos a partir de las horas equivalentes (horas a potencia máxima del aerogenerador).

Se necesitarán 2.200-2.500 horas equivalentes al año, más o menos. Por ejemplo, en la figura 32 tenemos la curva de potencia del aerogenador de la marca Gamesa, modelo G87-2 MW. Por lo tanto, si queremos comprobar que sea apto para un emplazamiento concreto, deberemos asegurarnos de que haya viento con una velocidad de entre 13 y 25 m/s durante 2.200 horas al año. Si el viento predominante en este lugar tiene una velocidad inferior, deberemos optar por otros modelos de aerogenerador.

Curva de potencia

La curva de potencia de un aerogenerador es un gráfico que indica cuál será la potencia eléctrica disponible en el aerogenerador para diferentes velocidades del viento.

Figura 32. Curva de potencia del aerogenerador Gamesa G87-2MW



Fuente: Datos extraídos de Gamesa (http://www.gamesacorp.com/es)

2) Habrá que asegurar que tenemos la posibilidad de evacuación de la energía eléctrica generada a la red eléctrica existente. Al mismo tiempo deberemos valorar la distancia que tenemos hasta el punto de evacuación (que puede implicar la construcción de nuevas líneas) y la capacidad de absorción de energía de la red en este punto. Todo esto nos lo deberá decir la compañía distribuidora local o la Red Eléctrica de España, si nos conectamos directamente a la línea de alta tensión.

3) Será necesario minimizar el impacto ambiental. Para la construcción de un parque eólico habrá que crear accesos a éste, que se usarán para construir el parque y para explotarlo. También habrá que valorar el impacto al medio, al patrimonio cultural, visual, etc., y la posible afectación a la avifauna local.

4) Se deberá ver si existe un consenso mayoritario en el territorio a favor de la construcción del parque eólico y comunicar adecuadamente la potenciación de la economía local e industrial que implica una instalación como un parque eólico en un municipio.

5) Habrá que valorar la capacidad financiera del promotor para construir y gestionar bien el parque. De este aspecto, sin embargo, se ocupa principalmente el banco o caja que da el crédito al promotor para que pueda realizar el proyecto.

Pasemos ahora a describir con más detalle los diferentes elementos que forman un parque eólico.

5.3.2. Aerogeneradores

Los **aerogeneradores** son los aparatos que transforman la energía cinética del viento en energía eléctrica.

Concretamente, la energía cinética del viento hace girar las aspas y la energía cinética de estas aspas es la que genera electricidad en un alternador. Como en

el caso de los generadores eléctricos o de las turbinas, el movimiento del eje se transforma en energía eléctrica.

Como apunte histórico, los aerogeneradores comenzaron a instalarse a mediados de los años cincuenta. En un principio, y como se puede ver en la figura 33, estas máquinas tenían poca potencia y unas dimensiones más pequeñas. Para poder incrementar la potencia de los aerogeneradores se aumentaron las dimensiones de las máquinas, hasta llegar a la actualidad, con la presencia de aerogeneradores con palas de 100 m, es decir, aproximadamente la misma longitud que un campo de fútbol de primera división.

Figura 33. Evolución de los aerogeneradores fabricados por la empresa Ecotecnia

Fuente: Adaptado de Alstom-Ecotecnia

Comentemos ahora con detalle las partes que forman un aerogenerador. Externamente, éste tiene cuatro partes diferenciadas y básicas, como podéis observar en la figura 34:

1) Cimentación: todos los aerogeneradores se deben instalar sobre una losa de hormigón que les sirva de anclaje al terreno y asegure su estabilidad.

2) Torre: es la parte de acero que aguanta las palas. La torre puede ser de acero macizo o de celosía, como las torres eléctricas. Por sus medidas y las fuerzas que deben soportar, normalmente se elige la torre de acero maciza, que, pese a tener un coste más alto, también aporta más garantías.

3) Rotor: está formado por las palas del aerogenerador y el buje, que es la pieza que une las palas. Las palas son uno de los elementos de los aerogeneradores

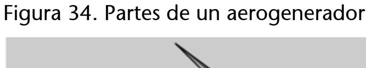
más delicados de fabricar y es necesario que estén muy bien equilibradas. La punta de pala es un elemento clave cuya forma puede hacer que se obtenga un 5-6% más de energía, y también es el elemento que más condiciona el ruido que emite un aerogenerador.

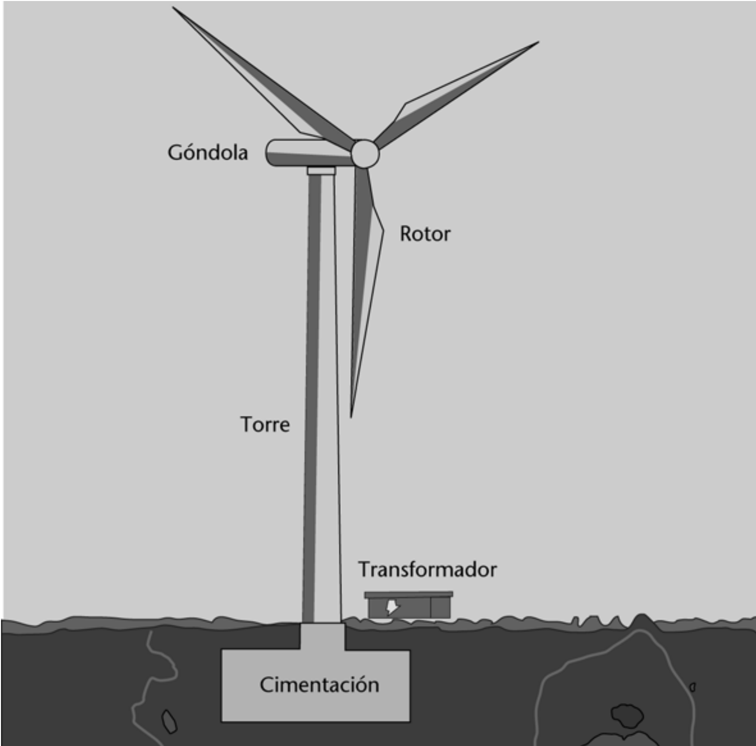
4) Góndola: es la parte del aerogenerador que está detrás del rotor. En su interior se hallan todos los mecanismos necesarios para transformar el viento en electricidad.

Góndola

Los elementos que hay en el interior de la góndola son:

- la multiplicadora, el generador y el transformador: transforman la energía cinética del eje en energía eléctrica;
- el mecanismo de orientación del aerogenerador: consta del motor de orientación y la corona de orientación;
- el sistema de control: formado por el anemómetro, la veleta y el controlador, y
- otros elementos de seguridad, como el freno mecánico.


Figura 34. Partes de un aerogenerador



Fuente: Adaptado de Danish Wind Industry Association (http://windwithmiller.windpower.org/)

Web de interés

En el campo de la energía eólica, hay varios recursos educativos que hacen muy comprensible esta energía. Debemos mencionar especialmente el recurso que ofrece la Asociación Danesa de la Industria Eólica, y que podréis encontrar en el enlace siguiente:

http://windwithmiller.windpower.org/es/kids/index.htm

Os recomendamos que realicéis el curso acelerado de energía eólica, en el que conoceréis las principales características de esta tecnología, de manera fácil e inteligible, en un entorno gráfico.

Respecto a los costes de los aerogeneradores, es interesante que sepáis que la torre representa un 33% del coste total y las palas un 18%, es decir, que estos dos elementos representan un 51% del coste total. El resto corresponde al resto de elementos (cableado, etc.).

Hasta aquí hemos visto las principales partes de un aerogenerador. Una de las cualidades más destacadas de esta tecnología es su naturaleza eminentemente mecánica, aparte de la base electrónica del controlador. Este aspecto provoca que la tecnología de los aerogeneradores sea muy robusta y que las máquinas se puedan reparar rápidamente y con mayor facilidad. Esto también permite

crear puestos de trabajo en las zonas próximas a los parques eólicos por la necesidad de mecánicos de molinos durante la explotación de la planta. Entremos ahora en los aspectos más técnicos de los aerogeneradores.

Coeficiente de potencia y curva de potencia de los aerogeneradores

Existen dos conceptos clave a la hora de definir las características de los aerogeneradores que nos aportan la misma información: el coeficiente de potencia y la curva de potencia del aerogenerador.

1) El coeficiente de potencia

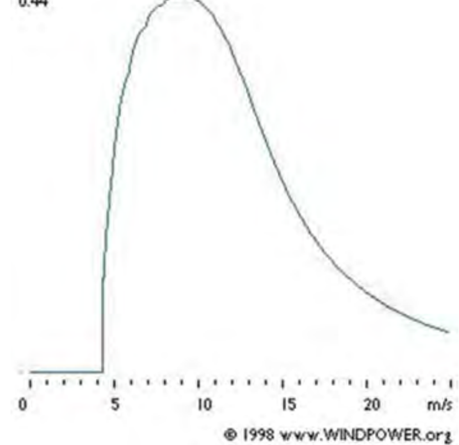
> El **coeficiente de potencia** es la relación entre la potencia eléctrica disponible y la potencia eólica de entrada, y se define a partir del término c_p.

El término c_p se lee "ce sub pe" y no debéis confundirlo con el calor específico que hemos tratado en el subapartado 1.4.1. Este término es muy interesante, ya que nos permite obtener directamente, a partir de la velocidad del viento, la potencia eólica que nos da el aerogenerador. ¿Cómo? Pues a partir de la fórmula de la potencia del viento que ya os hemos presentado en la ecuación 41 del subapartado 5.3. Si multiplicamos esta fórmula por el coeficiente de potencia, obtendremos directamente la potencia que da el molino para cada velocidad del viento. Así, si conocemos este dato, la fórmula de la potencia del aerogenerador será:

$$P = 1/2\ \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot c_p \qquad (42)$$

donde los términos son los que ya hemos presentado al principio del apartado. Sin embargo, el término c_p no será constante para todas las velocidades, sino que, tal y como podéis ver en la figura 35, varía para cada velocidad. El valor máximo de este coeficiente se da con la velocidad de diseño del aerogenerador (en el caso de la figura 35, esta velocidad es de 9 m/s y el c_p es 0,44). A modo de valoración de los aerogeneradores, si el coeficiente de potencia máximo c_p es superior a 0,5, podemos decir que se trata de una buena máquina. Si, en cambio, es inferior a 0,4, se trata de una máquina mala o de poca calidad.

Figura 35. Gráfico del coeficiente de potencia de un aerogenerador



Fuente: Datos extraídos de www.windpower.org

2) La curva de potencia del aerogenerador

La **curva de potencia** nos indica la potencia eléctrica del aerogenerador a diferentes velocidades del viento.

De hecho, la información que incluye es la misma que la del gráfico del coeficiente de potencia, pero está presentada de manera diferente. Hay que señalar que en este gráfico podemos apreciar implícitamente los conceptos de:

a) velocidad de arranque: cuando comienza a dar potencia el aerogenerador;

b) velocidad nominal: aquella velocidad en la que obtenemos el máximo rendimiento y el máximo c_p, y

c) velocidad de parada: velocidad a la que el aerogenerador se detiene por seguridad.

Tenéis un ejemplo de curva de potencia en el gráfico de la figura 32.

Para que veáis cómo están relacionados los términos de coeficiente de potencia y curva de potencia, os proponemos el ejercicio siguiente.

Actividad 5.1.

A partir de la curva de potencia de la figura 32, confeccionad el gráfico del coeficiente c_p para el aerogenerador Gamesa 87-2MW, sabiendo que el diámetro del área de barrido es de 87 m y que la densidad del aire es de 1,2 kg/m^3 (podéis considerar que es constante). ¿Cuál es el c_p máximo? ¿Se trata de una buena máquina?

Solución

En primer lugar hay que determinar los términos de la ecuación de potencia eléctrica del aerogenerador que conocemos. La ecuación que hay que seguir es la 42.

Conocemos $\rho = 1{,}2$ kg/m^3 por el enunciado.

$$A = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot (d/2)^2 = \pi \cdot (87/2)^2 = 5.945 \text{ m}^2 \qquad (43)$$

P y v vienen dadas por el gráfico.

Se trata de calcular, para cada velocidad, el coeficiente de potencia c_p a partir de la ecuación 42, despejando el término c_p:

$$c_p = P \,/\, (1/2 \cdot \rho \cdot A \cdot v^3) \qquad (44)$$

Los pares de puntos del gráfico, P y v, son los que se muestran en la tabla siguiente.

Valores de la curva de potencia del aerogenerador Gamesa 87-2MW

Velocidad (m/s)	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19-25
Potencia (kW)	79	181	335	550	832	1.175	1.530	1.816	1.963	1.988	1.996	1.999	2.000	2.000	2.000	2.000

Obtenemos un gráfico del coeficiente de potencia como el que se muestra en la tabla anterior (pasando los kW a W).

Figura 36. Gráfico del coeficiente de potencia de un aerogenerador

En este gráfico, el c_p máximo es de 0,456 para una velocidad de 8 m/s. Podemos decir, pues, que se trata de una maquina estándar, ni muy buena ($c_p > 0{,}5$) ni muy mala ($c_p < 0{,}4$).

Una vez tenemos el aerogenerador seleccionado para un emplazamiento concreto, es importante conocer también cómo se resuelve la distribución de los aerogeneradores sobre el terreno. Como aspecto clave, la alineación de los aerogeneradores va a venir determinada por la dirección del viento principal en el emplazamiento del parque eólico.

5.3.3. Elementos auxiliares

Aparte de los aerogeneradores, los parques eólicos tienen otros elementos que resultan clave para asegurar el buen funcionamiento del parque:

a) **Los caminos de acceso**. Para construir un parque eólico será necesario un camino de acceso a cada aerogenerador. Estos caminos son imprescindibles y deberán estar bien diseñados, ya que deben permitir la circulación de los convoyes especiales que transportarán las palas y las partes de la torre hasta el parque. Estos elementos, por sus dimensiones, deben tenerse en cuenta desde el momento inicial de diseño del parque eólico.

b) **El cableado** que une los diferentes aerogeneradores con el transformador del parque eólico. Este cableado normalmente se entierra bajo los caminos de acceso.

c) **El transformador**, al igual que en cualquier central de generación de electricidad, es imprescindible para transformar el voltaje de la electricidad generada por los aerogeneradores en la tensión o el voltaje de la línea eléctrica a la que está conectado el parque eólico. En algunos casos, también será necesario alargar la red eléctrica existente hasta el parque eólico. Cabe destacar que el centro de transformación del parque y la conexión de la red eléctrica son factores determinantes de la viabilidad técnica y económica del parque eólico.

d) El sistema de gestión y control. Se trata de un elemento auxiliar importante para los parques eólicos y que es necesario implantar para posibilitar su explotación. El sistema de gestión del parque eólico nos permitirá controlar el funcionamiento de éste y llevar un seguimiento detallado del estado del parque eólico en cada momento. Hay que tener en cuenta que puede haber aerogeneradores que no se vean desde el edificio de control, por lo que es necesario disponer de datos, en tiempo real, del estado de todos los aerogeneradores del parque eólico. Con estos sistemas, completamente informatizados, podemos efectuar un seguimiento exhaustivo de los parámetros siguientes:

- la producción de electricidad (diaria, mensual y anual);
- la disponibilidad de máquinas y el estado de mantenimiento de cada aerogenerador;
- las horas equivalentes de funcionamiento del parque que tenemos hasta el momento (para poder tener un control de la producción anual);
- la velocidad y la dirección del viento, y también el régimen de giro de los aerogeneradores, y
- las posibles incidencias y alarmas de los centros de control de los aerogeneradores.

Es importante tener claro, pues, que aparte de los aerogeneradores hay una serie de elementos auxiliares que son imprescindibles para el funcionamiento de un parque eólico. En algunos casos, el hecho de que estos factores no estén bien resueltos puede suponer que el parque no se construya o que el rendimiento de éste sea inferior al que se calculó en el proyecto de diseño. Por lo tanto, será necesario tenerlos muy en cuenta. Además, el impacto ambiental es otro elemento que también hay que considerar.

5.3.4. Impacto ambiental

Si bien es cierto que la energía eólica es una energía renovable y que como tal puede ayudar a transformar el modelo energético, dependiente de las energías fósiles, por otro más sostenible, existen ciertos impactos ambientales que deberemos considerar.

Los parques eólicos, al igual que muchos otros proyectos, están sujetos al procedimiento de evaluación ambiental de los proyectos, por lo que debe obtenerse una autorización administrativa para poderlos construir.

El procedimiento de los estudios de impacto ambiental es complejo, pero es importante que sepáis que analiza los elementos naturales y sociales que existen en el entorno del emplazamiento seleccionado. Además, estos estudios buscan obtener la mejor solución posible para el proyecto, es decir, que eligen, de entre las posibles alternativas, la que minimiza el impacto global del proyecto y asimismo se establecen medidas correctoras.

Veamos, en los siguientes apartados, el impacto negativo y positivo asociado a la construcción de un parque eólico.

Impacto ambiental negativo

Los impactos negativos de un parque eólico son, principalmente:

1) El impacto de los aerogeneradores sobre las aves: para proteger la avifauna es imprescindible, en la fase de estudio de impacto ambiental, determinar las especies de aves que habitan en la zona y los movimientos migratorios que se dan en ella. En función de las poblaciones que existan, será necesario tomar unas medidas u otras.

2) El impacto visual: éste es un punto que también se tiene en cuenta en el proyecto y que se estudia a fondo antes de decidir el emplazamiento de los aerogeneradores. Para poder evaluarlo, se estudia la cuenca visual del proyecto, es decir, la zona del territorio en la que será perceptible la instalación. Una vez que se conocen los posibles puntos de observación, se confeccionan montajes fotográficos para saber cómo se apreciarán las instalaciones desde cada zona. Se trata de un hecho cultural y social, y probablemente la aceptación de este tipo de instalaciones aumentará con el tiempo.

3) El impacto acústico: el ruido depende de la forma que tengan las puntas de las palas del aerogenerador y de la velocidad de giro. Las normativas actuales establecen que los aerogeneradores no se pueden poner a menos de cierta distancia de los núcleos de población o de las casas aisladas. Las distancias actuales garantizan que las molestias acústicas en los puntos habitados son mínimas. Aun así, es un aspecto que también se tiene en cuenta a la hora de diseñar los parques.

Otros impactos ambientales negativos

Aparte del impacto sobre las aves, el impacto visual y el impacto acústico, que son los más conocidos, durante el desarrollo y la proyección de los parques eólicos también existen otros impactos, como:

- El efecto de parpadeo (*flickering*): con este nombre se conoce el efecto de sombra que producen las aspas al girar sobre el territorio cuando el sol está bajo. Este aspecto se tiene en cuenta a la hora de decidir la ubicación de los aerogeneradores para asegurarse de que no se provocan molestias a la población de los alrededores.
- La afectación al patrimonio histórico y arqueológico: antes de construir los parques eólicos se lleva a cabo una prospección arqueológica del terreno para asegurarse de que no se afectan restos arqueológicos no catalogados. Este aspecto se lleva a cabo en la mayoría de los proyectos que se realizan en suelo no construido (líneas eléctricas, carreteras, etc.).

Hasta aquí hemos visto los principales impactos negativos que puede tener un parque eólico en el entorno. Entremos ahora a valorar los aspectos positivos que aporta la construcción de los parques.

Impacto ambiental positivo

Entre los aspectos positivos de un parque eólico se encuentran los siguientes:

1) Energía generada por los parques eólicos: la energía, como hemos visto en el apartado 3, es un aspecto totalmente necesario para la sociedad actual. No

nos podemos plantear vivir sin ella y el uso que hacemos de ella es notable. En la actualidad, como hemos visto, la energía proviene de fuentes con más impacto ambiental que la energía eólica (residuos radioactivos, humos, emisiones, etc.). Por lo tanto, si queremos continuar con el nivel energético global, es necesario que optemos por formas de generación más respetuosas y que éstas se alimenten de fuentes renovables, como la energía eólica.

2) Emisiones evitadas: los parques eólicos generan energía eléctrica sin emitir ningún tipo de contaminación al ambiente. Por lo tanto, observamos que el impacto ambiental es mucho menor que el de una central térmica. Esta tecnología tampoco genera gases de efecto invernadero, por lo que no contribuye al cambio climático.

3) Protección contra incendios: dado que los parques eólicos se sitúan en entornos rurales, ayudan a la detección de incendios, ya que el personal de explotación del parque puede detectar los incendios próximos. Además, todos los parques deben tener una balsa con agua para apagar posibles incendios del propio parque. Cuando el incendio no se da en el parque, sino en los alrededores, los bomberos utilizan también estas balsas. En este sentido, se ha comprobado que los parques eólicos ayudan a la prevención y extinción de incendios.

4) El impacto económico de la energía eólica en el municipio: cuando un municipio dispone de un parque eólico, los ingresos municipales se incrementan notablemente, ya que el ayuntamiento recauda entre el 2 y el 3% de la facturación del parque eólico en forma de impuestos. Estos ingresos ayudan, por lo tanto, al desarrollo de los equipamientos municipales. Además, los parques eólicos necesitan trabajadores, técnicos cualificados, que son locales, por lo que también contribuyen a la creación de puestos de trabajo.

Impacto económico

La construcción de parques eólicos en algunos municipios de baja densidad de población ha provocado que, con el dinero recaudado, se organicen viajes gratuitos para todo el pueblo.

Valoración global del impacto ambiental de un parque eólico

En este apartado hemos visto los impactos principales, tanto negativos como positivos, que tiene la implantación de los parques eólicos. En muchos puntos del territorio en los que se plantea la construcción de un parque eólico, se crean plataformas en contra de los parques, con argumentos diversos, pero muchas veces se alude a argumentos de protección del medio ambiente. Es decir, que se argumentaba en contra de los parques eólicos para proteger el medio ambiente, la fauna y la vegetación. Esto provoca que en algunos casos lleguemos a oír o leer en los medios de comunicación que "los ecologistas están en contra de la construcción de un parque eólico".

Greenpeace, organización ecologista de ámbito mundial, que seguro que conocéis, está completamente a favor del desarrollo de los parques eólicos. Está comprobado que la energía eólica, si se elabora un buen estudio previo de su impacto ambiental en el entorno y para las aves, tiene muchos más efectos positivos que negativos. Como en todo, seguro que podemos encontrar casos de

parques eólicos que se han construido incorrectamente y que, por lo tanto, han provocado efectos negativos sobre el medio.

5.4. Energía fotovoltaica

Hasta aquí hemos visto las principales características de los parques eólicos. Pasemos ahora a describir otra de las energías renovables: la solar fotovoltaica. En este apartado revisaremos los principales tipos de plantas fotovoltaicas y de instalaciones conectadas a la red. En el apartado 6 describiremos todos los elementos necesarios para construir una planta fotovoltaica.

Técnicos de energía fotovoltaica

Los técnicos competentes en estas instalaciones son los ingenieros industriales y los ingenieros de telecomunicaciones, entre otros.

5.4.1. Introducción: tipos de plantas solares

La energía solar se puede aprovechar de diferentes maneras, transformándola debidamente para que pueda satisfacer nuestras necesidades energéticas. A continuación enumeramos los tres tipos de aplicaciones de energía solar que se utilizan actualmente.

1) La energía solar térmica

Como su nombre indica, las instalaciones de energía solar térmica captan la energía solar con el fin de cubrir las necesidades térmicas.

Se instala en edificios con demanda de agua caliente, principalmente viviendas, polideportivos, escuelas, etc. La instalación consta de unos captadores negros que absorben la radiación solar y calientan un líquido que circula por su interior. Este líquido circula hasta un intercambiador en el que se calienta el agua. Esta agua caliente se utiliza para la ducha, las piscinas, la calefacción, etc. Para garantizar que siempre habrá agua caliente, el sistema debe tener algún tipo de apoyo, como una caldera de gas o un calentador termoeléctrico.

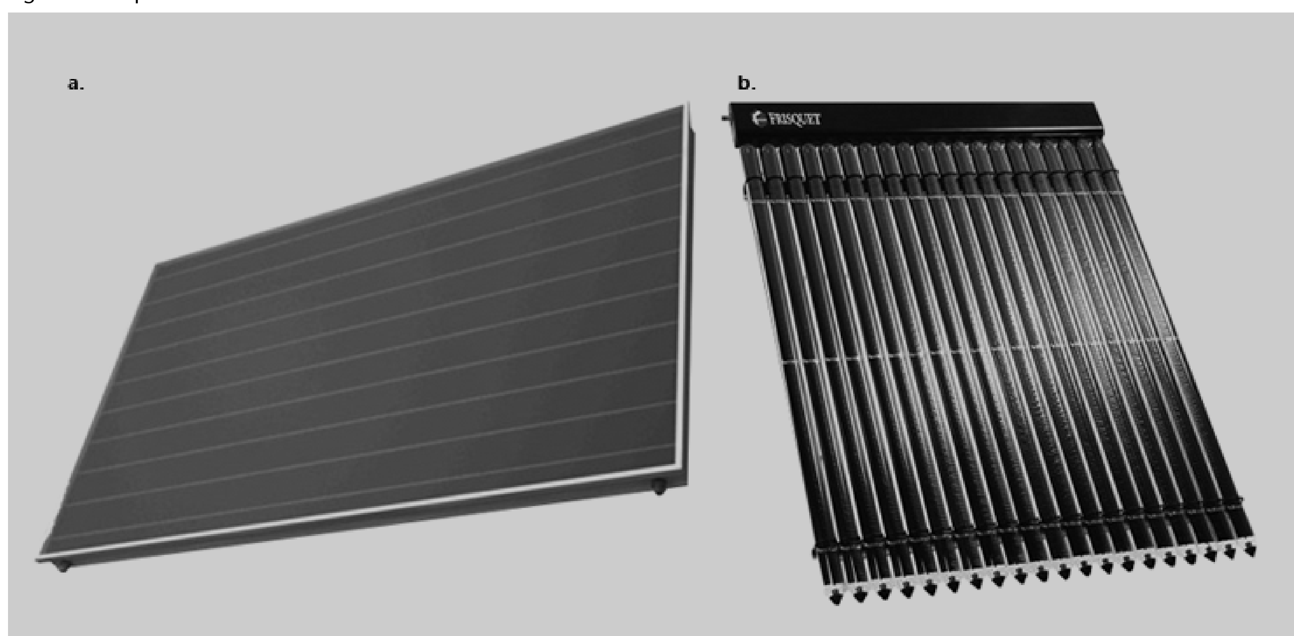
Existen diferentes tipos de líquidos que pueden utilizarse en las plantas solares. Normalmente es agua con glicol u otros productos químicos (como los anticongelantes) que garantizan el buen funcionamiento de la instalación. No se suele utilizar sólo agua porque conviene evitar que el líquido utilizado cambie su estado, es decir, que no se congele ni se evapore (las temperaturas de trabajo de las instalaciones solares pueden estar por debajo de los 0 °C y por encima de los 100 °C).

Se trata, pues, de un aprovechamiento meramente térmico del sol, sin generar en ningún caso electricidad. Este tipo de instalaciones son muy rentables y

ayudan a satisfacer la mayor parte de la demanda de agua caliente de los edificios. En España, actualmente es obligatorio instalar energía solar en todos los edificios de nueva construcción.

Los captadores son como los que se muestran en la figura 37. Pese a que puedan parecer dos tecnologías diferentes, ambos son captadores térmicos. El de tipo (a) es el más habitual y se denomina captador plano. El (b), denominado captador de tubos de vacío, alcanza temperaturas más altas y, dado que su coste también es más alto, se reserva sólo para las aplicaciones de alta temperatura. Para los sistemas experimentales de aire acondicionado con energía solar térmica se utilizan los captadores de tipo (b).

Figura 37. Captadores solares térmicos



a. Captador plano. Fuente: http://webdosb.com/images/ASTERSA/captador%20solar.jpg. **b**. Captador de tubos de vacío. Fuente: http://img.archiexpo.es

2) La energía solar termoeléctrica

> Las plantas solares termoeléctricas transforman la radiación solar en energía eléctrica.

El proceso consiste en evaporar un fluido mediante la concentración de los rayos solares para activar posteriormente una turbina y generar electricidad. Son las denominadas *centrales termoeléctricas*. Los dos tipos de plantas que se construyen son:

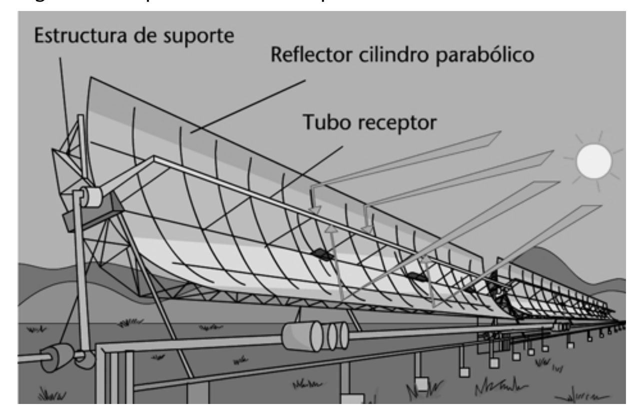
a) Captadores de cilindro parabólico: son captadores que reflejan los rayos solares que reciben en su superficie y los concentran en un tubo central. Por este tubo circula un fluido especial que, al recibir el calor solar e incrementar la temperatura, se convierte en vapor. Este vapor, igual que en el ciclo de Rankine explicado en el subapartado 4.2.2, se hace pasar por una turbina que, aco-

Fluido de trabajo

Los fluidos de trabajo pueden ser, entre otros, aire, vapor de agua, sodio fundido o sales fundidas, según la tecnología que se emplee.

plada a un generador, produce energía eléctrica. Estas instalaciones son como la que se muestra en la figura 38, y el conjunto del reflector cilíndrico gira siguiendo la trayectoria solar.

Figura 38. Captador de cilindro parabólico



b) Centrales de concentración solar de torre: éstas también tienen un efecto similar. Disponen de un campo de espejos para concentrar los rayos solares en una torre, o receptor central, en el que se genera vapor que se turbina para producir electricidad. Estas centrales son como la que se muestra en la figura 39. Por ahora es una tecnología en fase experimental, pero las plantas de la figura son dos plantas con una potencia eléctrica de 10 MW cada una.

Figura 39. Central de concentración solar de torre



Fuente: Ecología Microsiervos (http://eco.microsiervos.com)

3) La energía solar fotovoltaica

Para terminar, la radiación solar puede captarse en una célula fotovoltaica, en donde se transforma directamente en energía eléctrica de corriente continua.

De estos tres tipos de aplicaciones de la energía solar, sólo desarrollaremos con más detalle la energía solar fotovoltaica. En los subapartados 5.4.2 y 5.4.3 detallaremos los posibles tipos de plantas y los sistemas que se conectan a la red eléctrica. En el apartado 6 detallaremos los diferentes elementos que forman una planta solar fotovoltaica autónoma, es decir, que no está conectada a la red.

5.4.2. Tipos de plantas solares fotovoltaicas

La energía solar fotovoltaica puede instalarse para satisfacer diferentes necesidades y también en diferentes emplazamientos. Para cada uno de estos aspectos tendremos diferentes tipos de plantas. Por lo tanto, establecemos dos clasificaciones para las instalaciones fotovoltaicas: según la conexión a la red y según el emplazamiento de la instalación.

1) Según si se trata de una instalación conectada a la red eléctrica o no, tendremos dos tipos diferentes de plantas:

a) Instalación fotovoltaica autónoma

> La energía solar fotovoltaica puede instalarse para solucionar un problema de electrificación, es decir, para producir electricidad en un lugar al que no llega la red eléctrica.

En este caso estaremos hablando de una instalación autónoma. Este tipo de plantas las describiremos en el apartado 7.

b) Instalación fotovoltaica conectada a la red

> En este caso, lo que haremos será producir energía que inyectaremos a la red eléctrica y posteriormente cobraremos en función de la energía que hayamos generado.

Dado que se trata de un tipo de instalación subvencionada, según el marco de subvenciones que esté vigente, su construcción será más o menos atractiva (en el subapartado 5.4.3 se explica el marco legal). Estas instalaciones están formadas por los mismos elementos que la anterior, excepto que no disponen de sistemas para acumular la energía eléctrica generada.

Sea como fuere, en el caso de las instalaciones autónomas lo que buscaremos será satisfacer la demanda de electricidad. Por lo tanto, serán instalaciones diseñadas a partir del cálculo de la demanda. En el caso de las instalaciones conectadas a la red, el único objetivo que tendremos será conseguir el mayor número de beneficios económicos posible y, por lo tanto, optimizaremos la rentabilidad de la instalación y no nos importarán los períodos en los que no generen, ya que no estarán cubriendo ninguna demanda. El planteamiento de un tipo de plantas y el de otras es, como veis, completamente diferente.

2) También podemos clasificar las instalaciones **según el lugar en el que situemos los captadores**. De esta manera tendremos la clasificación siguiente:

a) Instalaciones ubicadas en cubiertas de edificios

> Se trata de instalaciones que aprovechan las cubiertas de los edificios, sin ocupar terreno natural.

Aún podemos encontrar dos subgrupos dentro de este grupo:

- Instalaciones integradas en cubierta: son aquellas en las que las placas fotovoltaicas se colocan directamente sobre la cubierta o la sustituye. Estas instalaciones tienen poco impacto visual y son las que mejor se integran. Dado que su orientación e inclinación será la que tenga el techo, se generará menos electricidad que en otros casos. Una instalación de este tipo es la que se muestra en la figura 40.

Figura 40. Placas solares fotovoltaicas integradas en cubierta



Fuente: http://4.bp.blogspot.com

- Instalaciones sobre cubierta con un sistema de soporte: la orientación y la inclinación de los captadores condicionan la generación de energía. Así, en algunos casos, se prima la generación eléctrica antes que su integración arquitectónica en el edificio. Estas instalaciones constan de una estructura, normalmente metálica, que da más inclinación a las placas solares, como se puede ver en la figura 41.

Figura 41. Placas fotovoltaicas en cubierta con sistema de soporte



Fuente: Inmoweb (http://www.inmoweb.com)

b) Instalaciones solares fotovoltaicas sobre el terreno

En otros casos podemos encontrar instalaciones ubicadas directamente sobre el terreno natural.

También existen dos subgrupos en función del soporte que tengan las placas solares:

- Estructura fija: se trata de instalaciones como las que hemos visto de cubierta con estructura, pero en lugar de estar sobre la cubierta, están sobre el terreno. Se enroscan en cimientos de hormigón para que presenten la robustez y la estructura necesarias. Las instalaciones de este tipo son como las que se muestran en la figura 42.


Figura 42. Instalación solar fotovoltaica sobre el terreno y fija



Fuente: Vade Solar (http://www.vade-solar.es)

- Seguidores solares: para aprovechar mejor la radiación solar, hay instalaciones que se construyen sobre unos elementos móviles que siguen el recorrido del sol. Este seguimiento puede ser a un eje (sólo se orienta desde cielo a la tierra) o a dos ejes (siguen completamente la trayectoria solar). La instalación que se muestra en la figura 43 es de seguimiento a dos ejes.

Sistemas de seguimiento solar

El seguimiento solar se puede realizar con un ciclo programado, que adapta cada día el movimiento a la trayectoria solar, o con sensores de radiación. En los días nublados, en las instalaciones que tienen seguimiento por radiación, podremos ver seguidores orientados de diferente manera. Estos sistemas tienen también controles de seguridad para el viento con el fin de evitar que su fuerza los pueda tumbar.

Figura 43. Instalación solar fotovoltaica sobre el terreno con seguidores



Fuente: Incoesa (http://www.incoesa.com)

5.4.3. Conexión a la red: marco legal

En la actualidad, las instalaciones solares fotovoltaicas no son rentables debido a sus costes. Sin embargo, en el caso de las instalaciones aisladas, que analizaremos con más detalle en el apartado 6, pueden llegar a resultar económicamente viables con respecto a las posibles alternativas de electrificación. Las que no son económicamente viables son las instalaciones conectadas a la red.

Os preguntaréis: y si es así, ¿por qué se construyen? Porque existe un sistema de primas e incentivos por parte de la Administración que las hacen más atractivas, tal y como hemos explicado en el subapartado 3.2.1.

Como idea, os debe quedar claro, pues, que la energía solar fotovoltaica conectada a la red no es económicamente viable si no dispone de este sistema de primas. Las primas las paga el Estado y, por lo tanto, hipotecan en parte el sistema eléctrico actual. Para que os hagáis una idea del nivel económico de las primas, según el Real Decreto 661/2007, las primas que se podían obtener eran de 0,30 €/kWh, cuando el coste del kilovatio por hora eléctrico está alrededor de los 0,05-0,06 €. Por lo tanto, estamos hablando de primas que ¡quintuplican el coste real del kilovatio por hora!

Es importante que se promuevan las energías renovables, sobre todo en sus fases iniciales y de desarrollo. Cuando se trata de tecnologías que no están maduras, se requieren incentivos para crear los tejidos industrial y comercial necesarios para construirlas con un coste asequible. Sin embargo, si las primas que se dan son demasiado buenas, se produce exactamente la situación inversa, es decir, se especula con la construcción de las plantas de energías renovables. Y esta especulación, así como el beneficio que obtienen los agentes que participan en ella, la acabamos pagando todos.

Por último, cabe señalar que si actualmente estas plantas no son viables por sí solas es porque el precio de la electricidad (el coste en €/kWh) es muy bajo. Es decir, estamos en una época en la que la energía tiene un coste muy bajo. La tendencia en el futuro será, sin duda, un incremento notable de los precios, que estará directamente relacionado con el incremento del precio del petróleo. En el momento en el que se incremente el coste de la electricidad de origen fósil, las plantas fotovoltaicas serán económicamente viables por sí solas y, por lo tanto, se podrán construir sin la necesidad de primas ni ayudas de las administraciones.

5.5. ¿Qué hemos aprendido?

- Hemos aprendido cómo se valoran los recursos renovables del viento y la radiación solar, aspecto que presenta una gran importancia en la implantación de las plantas de energías renovables, sobre todo en el caso de la

energía eólica, en el que los errores de cuantificación del viento pueden significar graves desviaciones de la energía generada.

- Hemos aprendido a realizar los cálculos elementales de cuantificación de la energía eólica que podemos obtener con un modelo de aerogenerador determinado. Hemos visto también las diferentes opciones de aprovechamiento de la energía solar, de las que sólo están en una fase avanzada la energía solar térmica, para calentar agua en los hogares, y la fotovoltaica; el resto se mantiene en una fase de desarrollo y pruebas.

La energía solar fotovoltaica es muy importante y puede llegar a solucionar problemas de electrificación. Por lo tanto, continuaremos analizando los diferentes elementos que forman una planta solar fotovoltaica, primero de manera descriptiva y después dimensionándolos para un caso concreto.

6. Sistema fotovoltaico autónomo

En este apartado continuaremos con la descripción de los sistemas fotovoltaicos, pero en esta ocasión detallaremos el dimensionado de cada elemento de un sistema fotovoltaico autónomo.

Una **planta fotovoltaica autónoma** es aquella que se diseña y se proyecta para satisfacer una demanda eléctrica concreta.

Lo más habitual es que estos sistemas abastezcan a una casa aislada.

En estos casos, la alternativa al proyecto puede ser la construcción de una línea eléctrica de varios kilómetros. Esto, como comentamos en el apartado 7, puede suponer un coste muy elevado y, además, una vez conectados a la red eléctrica podemos tener una calidad de servicio muy baja. Por ello, en estos casos, a la hora de hacer el estudio económico, lo que determinará la viabilidad económica no será el precio del kilovatio hora eléctrico de la red, sino el coste de construir la línea eléctrica. En otras ocasiones, el coste económico no será el elemento determinante de estas instalaciones, sino que lo que se valorará realmente será el argumento de la calidad de vida que supone tener electricidad.

A continuación veremos, en primer lugar, cuáles son las características principales de los diferentes elementos que componen los sistemas autónomos de generación de energía a partir de células fotovoltaicas. Posteriormente os mostraremos un ejemplo de cálculo de dimensionado y, finalmente, plantearemos posibles alternativas de electrificación rural autónoma con energías renovables.

¿Qué aprenderemos?

- Conoceremos los diferentes tipos de módulos fotovoltaicos que existen;
- veremos cómo funciona la tecnología fotovoltaica y las magnitudes que determinan las diferentes propiedades de los módulos que se utilizan;
- os presentaremos el funcionamiento de las baterías y las características de estos elementos que hay que tener en cuenta al diseñar las instalaciones;
- enumeraremos el resto de los elementos que componen una instalación solar fotovoltaica, y
- calcularemos y dimensionaremos una instalación solar fotovoltaica que pueda proporcionar la energía necesaria para nuestra casa.

¿Qué supondremos?

Supondremos que conocéis las magnitudes principales de un circuito eléctrico, como el voltaje, la intensidad y la resistencia; los factores de conversión de unidades, sobre todo de energía y de potencia; así como la corriente alterna y la continua.

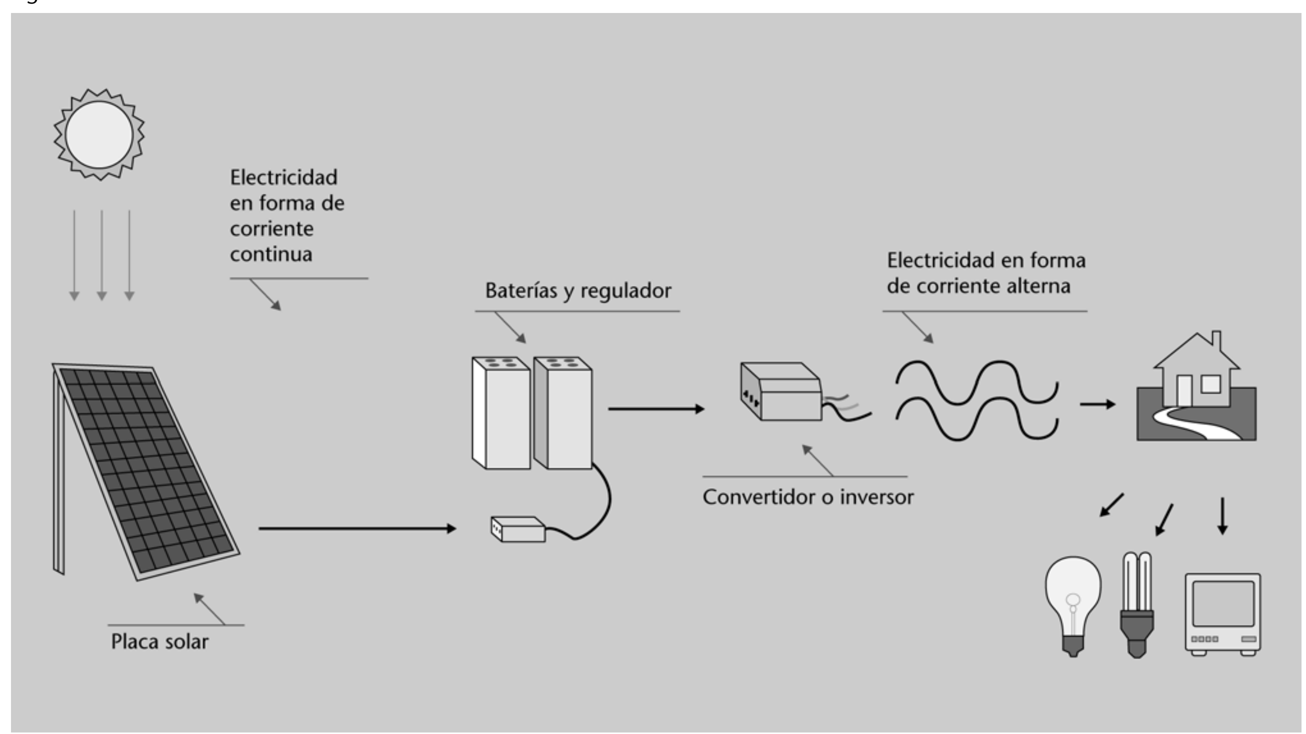
6.1. Elementos que componen una instalación fotovoltaica

Para entender cómo funciona una planta solar fotovoltaica, describiremos los diferentes elementos que la componen, los distintos tipos que puede haber y las características que hay que tener en cuenta para dimensionarlos.

Los diferentes elementos que componen una instalación solar fotovoltaica autónoma son los que podéis ver en la figura 44:

- los paneles fotovoltaicos como sistema de captación,
- las baterías para acumular energía,
- el regulador, y
- el inversor.

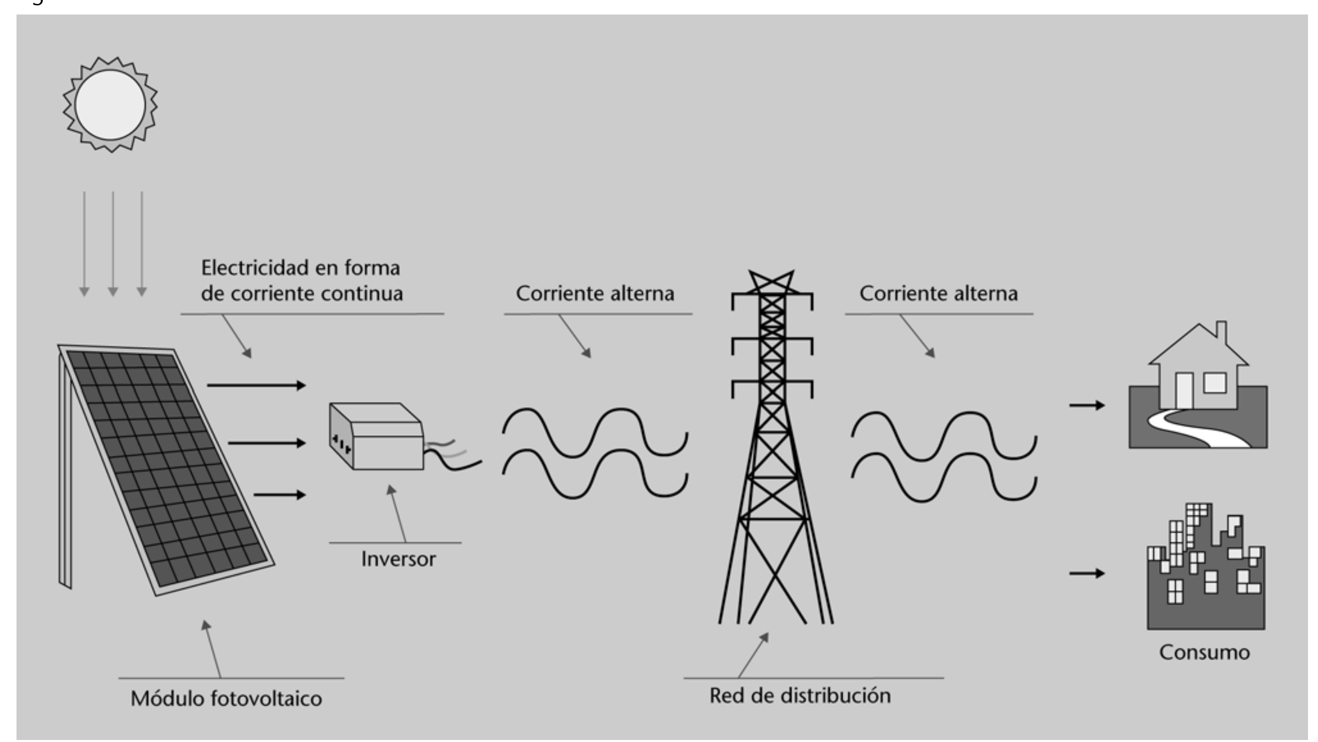
Figura 44



Esquema de una instalación solar fotovoltaica autónoma

Para quien tenga curiosidad por saber cómo son las plantas fotovoltaicas conectadas a la red, y no las autónomas, hay que decir que, en realidad, los elementos que componen la instalación son los mismos y que lo único que varía es el sistema de acumulación. Las plantas conectadas a la red no disponen de sistema de acumulación ni de regulador, sino que cuando se genera la energía, ésta se inyecta a la red y se vende en ese momento. Posteriormente, cuando se produce consumo eléctrico nocturno, se consume energía de la red. Las plantas conectadas a la red disponen, pues, de un transformador y de un punto de conexión a la red, en lugar de un sistema de baterías para acumular la energía, tal como podéis ver en la figura 45. El resto de los elementos que componen la planta son los mismos.

Figura 45. Instalación fotovoltaica conectada a la red



Las plantas fotovoltaicas grandes que se conectan a la red no disponen de acumuladores porque eso representaría un elemento más, con costes notables de adquisición y mantenimiento, y pérdidas por mayores conversiones de la energía eléctrica generada. Además, no aportaría beneficios económicos, sino que más bien conllevaría menos ingresos por las pérdidas de conversión.

6.1.1. Sistema de captación

Lo primero que definiremos será el funcionamiento de una placa fotovoltaica y qué tipos existen.

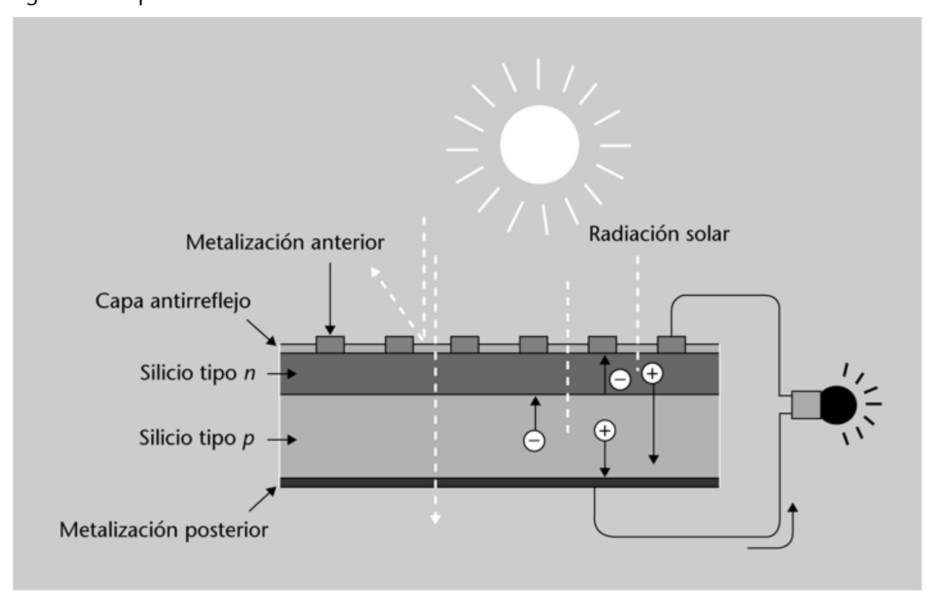
Una placa fotovoltaica está formada por un conjunto de células de silicio dopado (un material semiconductor) interconectadas entre sí. Concretamente, una célula son dos capas de silicio, una dopada positivamente (silicio de tipo p) y otra negativamente (silicio de tipo n), y unos contactos positivos en la parte anterior de la célula (que suelen ser de plata) y un contacto posterior negativo.

Dopaje positivo y negativo

Los semiconductores son materiales cuyas propiedades eléctricas se pueden adaptar mediante la adición de impurezas durante su fabricación para que satisfagan mejor necesidades concretas. En el caso del silicio de tipo p (o positivo) se le introduce boro y en el caso del silicio de tipo n (o negativo) se le introduce fósforo. Las impurezas se introducen cuando el silicio está fundido y quedan posteriormente en el interior de la estructura del material. Este proceso se denomina dopaje.

Podéis ver estos elementos en la figura 46.

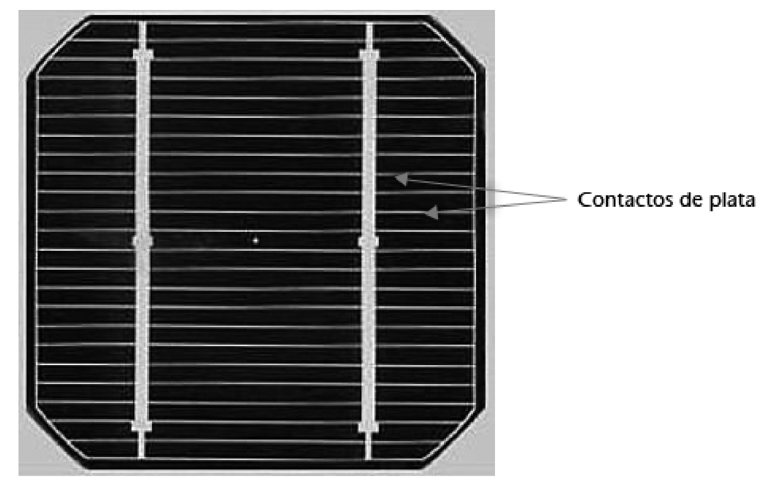
Figura 46. Esquema del funcionamiento de una célula fotovoltaica



Así, cuando estos materiales semiconductores dopados reciben la energía de un fotón de la radiación solar, liberan un electrón. Este electrón viaja por el interior del material hasta que lo capta alguno de los contactos de plata que hay sobre el silicio. En este momento se genera electricidad. Hay que decir que la corriente generada por una célula fotovoltaica es continua, no alterna.

En la figura 47 podéis ver la imagen de una célula fotovoltaica; en ella se aprecian perfectamente todos los contactos de plata que se sitúan en la superficie de la célula.

Figura 47. Célula fotovoltaica



A partir de este principio básico de funcionamiento existen diferentes patentes constructivas que mejoran, en mayor o menor grado, el rendimiento global de la transformación de energía solar en electricidad. Se puede modificar la forma o el circuito de contactores, o hacer que el silicio pueda captar más energía solar con una superficie rugosa, por poner sólo dos ejemplos.

Tipos de paneles fotovoltaicos

Aparte del diseño específico de la célula, un aspecto que sí debéis aprender a distinguir es el tipo de silicio que compone el captador fotovoltaico. Éstos son los tres tipos de silicio, de mayor a menor rendimiento: monocristalino, policristalino y amorfo.

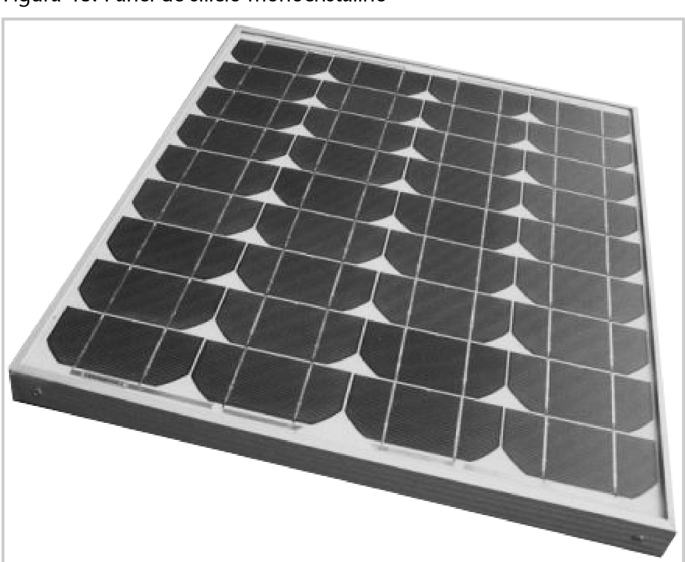
1) Silicio monocristalino

> El silicio monocristalino es el tipo de silicio de más calidad y, por tanto, con el que se obtiene mayor rendimiento en la transformación de energía solar en electricidad. También es el más caro.

En este caso, las células de silicio se fabrican de tal manera que el cristal de silicio que se forma a partir del silicio fundido es el mismo en todo el material. Este tipo de silicio es el más oscuro y su superficie es homogénea.

Podemos distinguir los paneles de silicio monocristalino porque las células que forman el panel no ocupan completamente su superficie. ¿Por qué? Porque en la fabricación de las células se obtiene una barra de silicio de sección circular de la cual, posteriormente, se cortan las células con hilo de diamante (como si cortáramos rodajas de una longaniza). Como el silicio monocristalino es caro y además tiene buen rendimiento, en la fabricación de los paneles no se recorta por completo esta sección circular, sino que únicamente se recortan las partes exteriores y así queda el panel, como un conjunto de células achaflanadas. Este tipo de módulo presenta un rendimiento medio del 14 al 15% y tiene prestaciones aceptables con radiación solar baja. Una célula de silicio monocristalino es la que se ha mostrado en la figura 47, y un panel monocristalino es el que aparece en la figura 48, donde podéis ver que no toda la superficie está ocupada por silicio.

Figura 48. Panel de silicio monocristalino



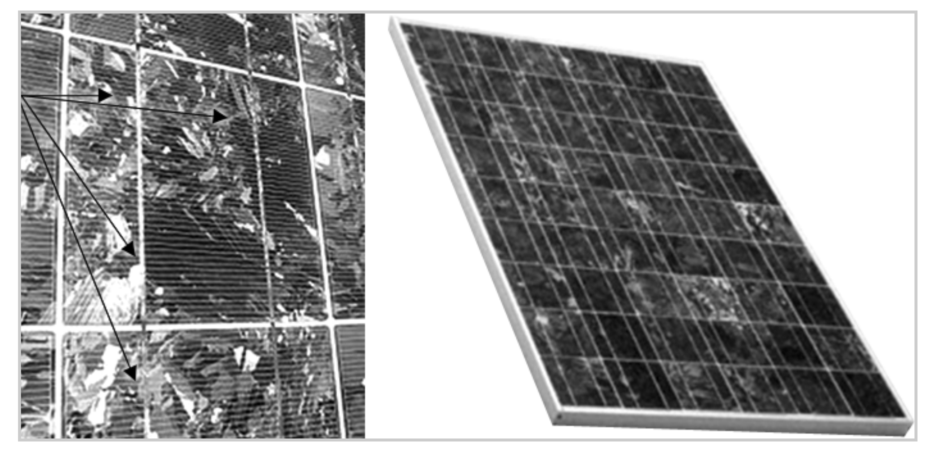
Fuente: Solostocks (http://imagenes.solostocks.com)

2) Silicio policristalino

Cuando en el proceso de fabricación se enfría el silicio, si se hace lentamente, el silicio se solidifica y forma cristales diferentes. Éste es el silicio policristalino. En este caso, el rendimiento es menor que el del silicio monocristalino, pero el material también es menos caro.

El panel fotovoltaico se construye con células de sección cuadrada, por lo que se ocupa perfectamente toda la superficie del panel. Este tipo de módulo presenta un rendimiento medio del 12 al 13% y muy bajo rendimiento con radiación solar baja. En la figura 49 podéis ver una célula de silicio policristalino en la que se aprecian los diferentes cristales (señalados con flechas) y un panel que, como podéis apreciar, no tiene en este caso ninguna parte sin cubrir de silicio.

Figura 49. Célula y panel de silicio policristalino



Fuente: Wikimedia Commons (izquierda) y Proyectos técnicos y maquinaria LTDA [http://blog.ptmcolombia.com] (derecha)

Figura 49

El proceso de fabricación de las células de silicio comienza con la purificación del silicio, según diferentes procesos patentados. Posteriormente, este silicio fundido se solidifica. En función de los procesos de purificación y solidificación obtenemos un tipo de silicio u otro.

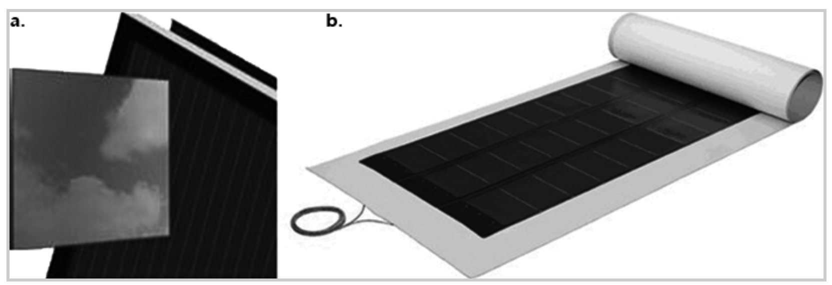
3) Silicio amorfo

El último tipo de silicio, denominado silicio amorfo, no tiene cristales, y a menudo se hace enfriar rápidamente sobre soportes de plástico o vidrio.

De hecho, éste es el tipo de silicio con el que estamos más familiarizados, ya que casi todas las calculadoras tienen una placa de silicio amorfo para poderse cargar cuando no tienen pilas. Este tipo de silicio tiene un tono rojizo, a diferencia de los demás, que suelen ser más azulados, y su rendimiento es mucho menor. Se utiliza para las instalaciones solares fotovoltaicas que se instalan en las naves industriales. Tiene aplicación, pues, en aquellos casos en los que se quiere conseguir unos ingresos por generación eléctrica adicionales, con una instalación de bajo coste y que se amortiza en un tiempo más o menos razonable. Nunca se utilizará en instalaciones autónomas, ya que su bajo rendimiento requeriría duplicar o triplicar la superficie necesaria de paneles fotovoltaicos. Este tipo de

módulo tiene un rendimiento medio del 6%, pero presenta un buen comportamiento con radiación solar baja. En la figura 50 podéis ver el detalle de una célula de silicio amorfo y también un tipo de captador flexible de silicio amorfo, como los que se colocan en las naves industriales.

Figura 50. Célula y panel de silicio amorfo



Fuente: **a.** Solostocks (http://imagenes.solostocks.com) y **b.** Architekten Information System (http://www.ais-online.de)

En función del tipo de silicio que elijamos, conseguiremos más o menos rendimiento. En los casos en los que la superficie no sea un factor limitante, como en el caso de las naves industriales, se podrá elegir un tipo de silicio amorfo, de menos rendimiento, pero con un coste mucho más económico. Para las instalaciones autónomas deberemos elegir un panel de silicio monocristalino o policristalino, según los costes y la superficie de que dispongamos.

Para acabar, es interesante que conozcáis la evolución del mercado del silicio. La pureza del silicio que se utiliza en electrónica debe ser del 99,9%. Inicialmente, como la demanda de silicio para la construcción de paneles fotovoltaicos era baja, se utilizaba para estas aplicaciones el silicio de desecho de la industria electrónica. Poco a poco, sin embargo, la demanda de silicio para aplicaciones fotovoltaicas ha aumentado en todo el mundo y en la actualidad supera la demanda de silicio del sector electrónico. El mercado de fabricación de silicio es muy reducido y existen pocas instalaciones en el mundo que se dediquen a la purificación de este elemento. La disponibilidad de silicio a costes razonables es, pues, un punto débil en el mercado de la energía solar fotovoltaica.

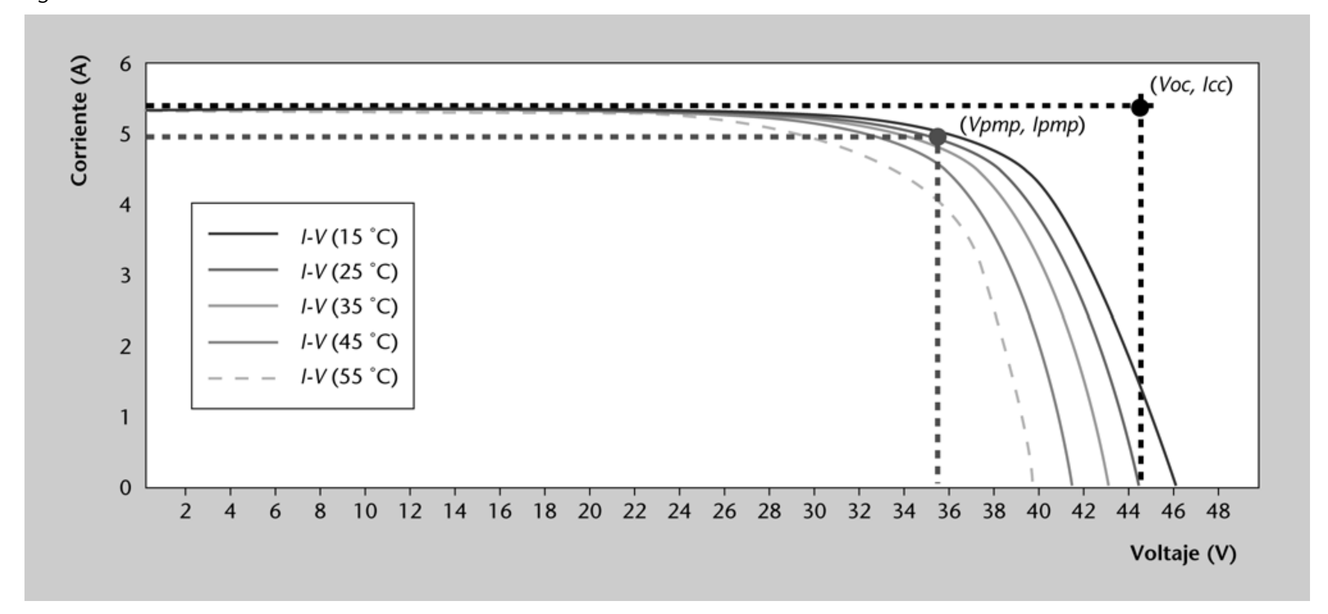
Curva *I-V*

Antes de comenzar a definir los parámetros característicos de un panel solar, es importante tener en cuenta que, por su naturaleza, una célula solar es un generador de corriente y no de voltaje. Este principio es importante para entender el comportamiento de la célula fotovoltaica ante las variaciones de los principales parámetros que la afectan, que son la radiación solar incidente, el voltaje de trabajo y la temperatura de trabajo.

Para mostrar el comportamiento de un módulo solar fotovoltaico, lo que se utiliza normalmente es la curva *I-V* (intensidad-voltaje) para una radiación solar incidente de 1.000 W/m^2 (es un ensayo normativo que permite comparar los diferentes gráficos obtenidos). Un ejemplo de ello lo encontramos en la figura 51, que es la curva de un módulo fotovoltaico facilitada por su fabricante. Fi-

jaos en que se han añadido, además, las curvas resultantes en caso de variación de la temperatura.

Figura 51. Curva *I-V* de un módulo fotovoltaico.



Esta curva nos permite describir algunos puntos característicos que nos servirán para catalogar, definir y comparar los módulos de diferentes materiales o fabricantes.

Como podéis apreciar en la figura 51, el voltaje máximo varía en función de la temperatura. A menor temperatura, más voltaje, es decir, mejor rendimiento. Así, en verano, una placa fotovoltaica en los Pirineos tendrá mejor rendimiento que la misma placa en Granada, donde tendrá menos rendimiento por sobrecalentamiento.

1) Corriente de cortocircuito o I_{cc} (o I_{sc}, del inglés *short circuit*): corresponde al valor de corte de la curva con el eje de ordenadas, es decir, el punto de corte con el eje de la intensidad, cuando el voltaje es cero. Es la corriente que obtendremos si ponemos en contacto los contactores positivos y negativos de la célula, es decir, si cortocircuitamos la célula, y es la corriente máxima que nos puede dar la placa fotovoltaica. En el caso del gráfico de la figura 51, la corriente de cortocircuito es de 5,13 A.

2) Voltaje de circuito abierto o V_{co} (o V_{oc}, del inglés *open circuit*): cuando el módulo no tiene ninguna carga conectada (y por tanto no circula intensidad por el circuito) y su superficie se encuentra iluminada, el voltaje aumenta ligeramente y alcanza un máximo. Es el punto del gráfico en el que la intensidad es cero, es decir, el punto de corte con el eje de abscisas. En nuestro caso, para una temperatura de 25 °C, el voltaje de circuito abierto será de 44,6 V.

3) Punto de máxima potencia: de los diferentes puntos que forman la curva *I-V*, hay uno que determina una potencia máxima. Como estamos hablando de corriente continua, la potencia (*P*) es el producto del voltaje (*V*) por la intensidad (*I*), es decir:

$$P = V \cdot I \tag{45}$$

Por tanto, el punto de máxima potencia será aquel que en el gráfico maximice el área del rectángulo que obtenemos para cada punto. En nuestro caso, y siguiendo el ejemplo de la figura 50, el punto de máxima potencia a 25 °C es el

de intensidad (I_{pmp}, intensidad del punto de máxima potencia) igual a 4,77 A y voltaje (V_{pmp}, voltaje del punto de máxima potencia) igual a 35,7 V. Tendremos, por tanto, que la máxima potencia (W_p) de este módulo es de 170 W (35,7 · 4,77). Este valor lo obtendremos de las características proporcionadas por el fabricante, ya que el punto del gráfico donde se maximiza el área no es evidente y habría que utilizar métodos matemáticos para encontrarlo, que quedan fuera del alcance de este módulo.

4) Factor de forma (FF): es una relación matemática que pone de manifiesto la proporcionalidad entre el valor de la superficie del rectángulo delimitado por el punto de máxima potencia (V_{pmp}, · I_{pmp}) (señalado en la figura 51) y el rectángulo que se formaría desde los valores máximos de la curva (V_{co}, · I_{cc}) (señalado en la figura 50). Se trata de un valor adimensional que resulta útil para comparar el comportamiento del panel ante variaciones de radiación o temperatura.

Matemáticamente se calcula como:

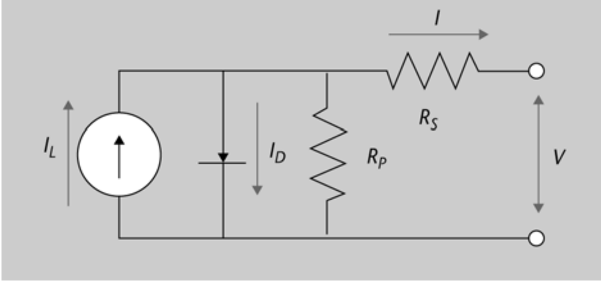
$$FF = (V_{pmp} \cdot I_{pmp}) / (V_{co} \cdot I_{cc}) \quad (46)$$

En nuestro caso, el factor de forma será igual a 0,74. Cuanto más se aproxime a 1, mejor será el comportamiento del módulo con las variaciones.

Circuito eléctrico equivalente que describe una célula fotovoltaica

Una célula fotovoltaica es un generador de corriente (I_L) que presenta un componente de pérdidas que podemos asimilar a un diodo directamente polarizado (I_D). También tenemos unos contactos eléctricos que se oponen al paso de la corriente y que podemos asimilar a una resistencia en serie (R_S). Finalmente, se dan unos fenómenos de recombinación interna de electrones en los extremos del material que son difíciles de cuantificar y representar, y que se asimilan a una resistencia en paralelo (R_P). Si con todos estos factores realizamos una representación del esquema del circuito eléctrico, obtenemos lo que se muestra en la figura 52, donde se representan todos los elementos que hemos descrito.

Figura 52. Circuito eléctrico equivalente de una célula fotovoltaica



6.1.2. Acumulación: baterías

Los sistemas autónomos, no conectados a la red, necesitan un sistema de acumulación que permita independizar el momento de generación de la electricidad del momento de demanda.

En el caso de las instalaciones fotovoltaicas, esta función la realiza normalmente un sistema de baterías. Para cumplir sus funciones, es importante que el sistema de acumulación permita distintos ciclos de carga y descarga sin perder propiedades de acumulación.

Las funciones básicas del sistema de baterías son:

- suministrar una potencia instantánea superior a la de los módulos fotovoltaicos;
- mantener estable el voltaje de la instalación;
- suministrar energía en los momentos en los que no haya radiación. Esta situación se puede dar, por ejemplo, en los ciclos día-noche o cuando, debido al mal tiempo, no se produzca energía eléctrica fotovoltaica.

Las baterías que se utilizan mayormente en las instalaciones solares fotovoltaicas son las de plomo y ácido, por motivos económicos. El ácido de estas baterías es normalmente ácido sulfúrico.

Un aspecto básico para el funcionamiento de las baterías es la capacidad de acumulación, que os detallamos en el subapartado siguiente.

Capacidad de acumulación de las baterías

La capacidad de acumulación (C_B) de las baterías es una cuestión básica que es necesario tener en cuenta. Se expresa en amperios hora (Ah) y se calcula multiplicando la intensidad de descarga que puede proporcionar la batería (I, en amperios) por el tiempo de descarga (t, en horas).

Tiempo de descarga

El tiempo de descarga es el tiempo que transcurre desde que comenzamos a consumir energía de la batería hasta que ésta llega al final del ciclo, es decir, al estado de mínima carga que puede conseguir sin perder capacidad de carga o estropearse.

Así:

$$C_B \text{ (Ah)} = I \text{ (A)} \cdot t \text{ (h)} \qquad (47)$$

En cuanto a la carga de energía de la batería, la profundidad de descarga es el parámetro que nos indica a qué nivel de descarga hemos llegado (al 50% de la capacidad, al 10%, etc.).

Por ejemplo, una batería que indique una capacidad de acumulación de 650 Ah_{c100} puede proporcionar 6,5 A en una descarga de 100 h, o 13 A en una descarga de 50 h.

Capacidad de una batería

El valor de la capacidad de descarga se expresa en amperios hora y un subíndice c100, que indica que esta capacidad de la batería la tendremos para un ciclo de descarga de 100 h.

Pero, en realidad, la capacidad de acumulación no es lineal. Será necesario tener muy en cuenta que, en función del tipo de descarga que hagamos, el rendimiento de la batería no será el mismo. Si hacemos una descarga suave y lenta, el rendimiento será bueno y sí que podremos aprovechar toda la capacidad de carga indicada.

Si, por el contrario, realizamos una descarga rápida, de una gran intensidad en pocas horas, la batería se calentará y, por tanto, el rendimiento de la reacción será más bajo y, como consecuencia, perderemos también capacidad de la batería. Lo mismo sucederá con el régimen de carga: si la cargamos con una intensidad alta y en pocas horas, tendremos menos energía acumulada. De hecho, si alguna vez habéis tenido problemas con la batería del coche después de dejarlo parado durante un tiempo, habréis visto que, a veces, el mecánico propone dejarla una noche haciendo una carga suave y profunda. De esta manera, si la batería está en condiciones, se puede volver a recuperar sin que haya perdido su capacidad. En casos extremos en los que se haga un mal uso, la batería será irrecuperable y habrá que cambiarla.

En cualquier caso, si mantenemos un sistema de carga y descarga suave de las baterías, conseguiremos alargar su vida útil. Por ello, en una instalación solar fotovoltaica con acumulación es imprescindible disponer de un regulador, como el que describiremos en el subapartado siguiente.

6.1.3. Regulación

Un elemento clave de las instalaciones fotovoltaicas, para proteger los paneles fotovoltaicos y las baterías, y también alargar su vida útil, es el regulador.

> Un **regulador** es un aparato que gestiona la instalación y que, con cierta información, da órdenes y hace actuar al sistema solar para evitar daños a los elementos.

Es necesario proteger sobre todo el sistema de baterías porque, junto con los paneles, son los elementos más caros.

Las principales funciones o prestaciones de los reguladores son:

- Protección contra la sobrecarga del acumulador (también se conoce como corte por alta): es la función básica del regulador y, en su ausencia, las baterías se calentarían y ello podría provocar problemas de funcionamiento o averías.

- Alarma por batería baja: el regulador emite señales sonoras o luminosas cuando el acumulador se encuentra muy descargado. De esta manera, el usuario puede moderar su consumo y evitar descargas profundas de las baterías, que son perjudiciales para la vida útil de éstas.

- Desconexión por batería baja (o corte por baja): si el nivel de carga del acumulador es demasiado bajo, el regulador corta directamente el suministro eléctrico para evitar descargas profundas de las baterías, que son perjudiciales, tal como hemos visto en el subapartado 6.1.2.

- Protección contra cortocircuitos: esta función permite proteger el propio regulador y el sistema de baterías ante los cortocircuitos que se puedan dar en los circuitos eléctricos de consumo de la instalación.

- Visualización de funciones: muchos reguladores presentan diferentes opciones que nos permiten obtener información del estado de la instalación en cada momento. Por ejemplo, la intensidad que dan los módulos fotovoltaicos, el estado de las baterías, etc.

Al seleccionar un regulador deberemos tener en cuenta dos parámetros:

1) el voltaje de funcionamiento, que deberá ser el mismo que el del sistema de baterías (12, 24 o 48 V), y

2) la intensidad máxima de demanda, que deberá ser un 10% superior a la máxima que puedan dar los módulos fotovoltaicos instalados.

Existen dos tipos de reguladores: los de tipo paralelo y los de tipo serie. Los primeros sólo son recomendables para las instalaciones pequeñas, ya que tienen muchas menos prestaciones y se estropean más a menudo por sobrecalentamiento. En las instalaciones grandes se utilizarán, pues, los de tipo serie.

Actualmente, la versión más sofisticada de estos equipos son los reguladores con seguimiento del punto de máxima potencia. Estos reguladores independizan eléctricamente el sistema de baterías del campo de captadores solares y permiten de esta manera que los paneles fotovoltaicos no trabajen al voltaje del sistema de baterías (12, 24 o 48 V), sino que pueden trabajar en el punto de máxima potencia y así obtenemos más energía.

6.1.4. Inversor continuo-alterno

Hasta aquí hemos visto tres elementos clave de una instalación fotovoltaica: los módulos que captan y transforman la energía solar, las baterías que acumulan la energía y el regulador que protege los elementos de un posible mal funcionamiento. Aparte de estos tres elementos, una instalación fotovoltaica debe tener un elemento que se encargue de transformar la corriente continua de los módulos fotovoltaicos o de las baterías en corriente alterna apta para el consumo de la instalación eléctrica. Este elemento es el inversor u ondulador.

Corriente continua

La corriente continua es aquella que no varía con el tiempo. La corriente alterna tiene un comportamiento sinusoidal, con una frecuencia de, por ejemplo, 50 Hz en Europa y 60 Hz en América.

En las primeras instalaciones de energía solar fotovoltaica se adaptaban todos los consumos y aparatos del hogar para que pudieran funcionar con corriente continua. Este hecho provocaba que la gama de electrodomésticos

y aparatos fuese reducida, aparte de que también resultaban más caros por la poca salida que tenían.

Con la evolución de la electrónica de potencia aparecieron los aparatos convertidores de corriente continua a corriente alterna, que son los denominados **inversores** u **onduladores**.

El uso de los inversores supone una serie de ventajas, como pueden ser:

- la facilidad de compra de aparatos eléctricos, lo cual permite acceder a los de alta eficiencia;
- el mantenimiento de valores y forma de onda estables de voltaje, independientemente del estado de carga de las baterías, y
- el hecho de trabajar a voltajes superiores, lo cual permite reducir la sección de cableado de la vivienda, con el consiguiente ahorro económico, e instalar las protecciones eléctricas habituales. También se reducen las pérdidas por efecto Joule.

En resumen, el inversor posibilita que nuestra casa funcione como si estuviese conectada a la red. El uso de estos aparatos también conlleva ciertos inconvenientes, como:

- la instalación consta de un elemento más, y si éste se estropea, no habrá suministro;
- el inversor tiene ciertas pérdidas que es necesario compensar con la instalación de más captadores fotovoltaicos (se estima que las pérdidas asociadas oscilan en torno al 5%);
- para las instalaciones pequeñas, el coste del inversor puede representar un gasto importante (en torno al 20% de la inversión), y
- los inversores baratos pueden causar problemas de interferencias y ruidos en radios, teléfonos móviles o emisoras.

Las principales características que definen un inversor son:

a) El voltaje o la tensión nominal de entrada: deberá ser la misma que la del acumulador (12, 24, 48 V).

b) El voltaje de salida: será de 230 V, lo habitual en la red eléctrica europea.

c) La potencia nominal en kW: será la potencia máxima que podrá suministrar el inversor a la instalación. Entre la gama de inversores, deberemos elegir

el que nos aporte la potencia máxima que necesitamos, y si no hay ninguno, podemos optar por conectar dos. Esta potencia correspondería, en caso de que hiciésemos en casa una instalación fotovoltaica autónoma, a la potencia que tenemos contratada en la compañía eléctrica.

d) Estabilidad del voltaje de salida: por motivos de calidad y buen funcionamiento de los aparatos, se deberá mantener en torno al 10%, que es lo mismo que admiten las redes eléctricas.

e) Tipo de onda: en función del modelo de inversor podemos tener tres tipos de ondas diferentes, lo que afectará también a la calidad de la corriente que suministraremos:

- Onda cuadrada: son los más sencillos y económicos, pero también poco estables. No soportan demasiadas sobrecargas y causan muchas interferencias en los aparatos electrónicos de radio y telefonía. Sirven principalmente para los circuitos de iluminación y cargas resistivas.

- Onda sinusoidal modificada: son los más comunes por su buena relación calidad-precio y soportan bien las sobrecargas, pero también pueden causar interferencias y ruidos en los aparatos de telecomunicaciones.

- Onda sinusoidal pura: son los equipos que proporcionan más calidad de servicio y son muy estables. Soportan bien los picos de consumo y no causan interferencias. Son también los más caros.

f) Capacidad de sobrecarga y protección térmica: deberemos tener muy en cuenta si tenemos motores eléctricos en la instalación, ya que al arrancar los motores, éstos pueden consumir hasta cinco veces su potencia nominal.

g) Eficiencia: la eficiencia del inversor estará en función de la potencia de suministro. Deberemos verificar que, en el rango normal de trabajo, el rendimiento del inversor sea alto.

h) Arranque automático y estado de espera: el inversor se conecta automáticamente al detectar consumo y cuando no hay, puede apagar circuitos para evitar los posibles “consumos fantasmas”, sobre los que hablaremos en el subapartado siguiente.

i) Protección contra la inversión y los cortocircuitos: estas opciones son básicas para proteger la instalación durante su vida útil.

Así pues, el inversor será un elemento más de la instalación solar fotovoltaica y nos permitirá transformar la corriente continua de las células fotovoltaicas o de las baterías en corriente alterna. De esta manera, el consumo y la instalación serán iguales a los de las instalaciones conectadas a la red.

En caso de que tengamos una instalación conectada a la red, el inversor que deberemos seleccionar tendrá que ser el adecuado a esta aplicación. En el

mercado hay gamas de inversores optimizados para la conexión a la red y otros optimizados para las instalaciones solares autónomas. Por tanto, tendremos en cuenta este factor a la hora de seleccionar el modelo de inversor adecuado a cada caso.

6.2. Dimensionamiento de la instalación

Una vez hemos descrito todos los elementos que componen una instalación solar fotovoltaica, es el momento de pasar a describir cómo se dimensiona una instalación de este tipo.

Para hacerlo, iremos paso a paso y definiremos cuáles son los diferentes aspectos que debemos tener en cuenta y los cálculos que hemos de realizar.

Actividad

A medida que vayáis leyendo el apartado, haced el cálculo de la instalación solar fotovoltaica que necesitaríais para satisfacer el consumo de vuestra casa.

A modo de resumen, el dimensionamiento de la instalación que os detallamos a continuación tendrá en cuenta los conceptos siguientes:

1) Datos de entrada

a) Demanda energética (características de los consumos que debe cubrir)
b) Cálculo de la energía necesaria
c) Radiación solar incidente

2) Datos a calcular

a) Potencia de los módulos necesaria
b) Capacidad y voltaje del acumulador
c) Sección de cable necesaria
d) Tipos de equipos auxiliares necesarios
e) Rentabilidad económica del sistema

6.2.1. Demanda energética

Lo primero que es necesario tener en cuenta para hacer el cálculo de una instalación solar fotovoltaica autónoma es la demanda de electricidad que tendremos.

Para realizar los cálculos, iremos viendo, para cada equipo, cuál es el consumo medio y obtendremos así un consumo o una demanda que satisfacer.

En el ejemplo que desarrollaréis, el cálculo de la instalación de vuestra casa, os será fácil conocer los diferentes consumos, ya que actualmente disponéis de

electricidad y ya estáis acostumbrados a ello. El problema que se da a menudo al calcular la demanda es que, como aún no se tiene electricidad (pensad que la instalación se pone, precisamente, para pasar a tenerla), no se cuantifican bien los consumos. Normalmente, cuando se pide al futuro usuario las horas de consumo de los diferentes aparatos, éste tiende a responder a la baja.

Se ha visto que, una vez en funcionamiento, la electricidad resulta muy útil para la casa y cada vez se producen más consumos que no estaban calculados, así que las instalaciones se quedan "pequeñas" enseguida. Será importante, pues, tener cierta psicología con el futuro usuario y prever el uso de aparatos electrónicos futuros para que la instalación sea tan adecuada a los usos necesarios como sea posible.

Para comenzar con el cálculo de consumos, lo primero que deberemos determinar será:

1) tipo de utilización: fines de semana o diaria
2) estacionalidad de la utilización: verano/invierno
3) número de usuarios del sistema
4) instalación existente: producción y suministro (si la hay)

A partir de estos datos realizaremos una previsión y elaboraremos una tabla de consumo, teniendo en cuenta la potencia y el uso que se hará de los diferentes equipos, por lo que respecta al consumo medio diario. En el caso de vuestra casa, que es el ejemplo que debéis ir haciendo en paralelo a la lectura de este apartado, os será sencillo. En los casos en los que no existe una instalación previa, será necesario utilizar datos y valores medios.

Para determinar los consumos eléctricos, lo más exacto sería tomar los catálogos de los fabricantes de los diferentes equipos y extraer de ellos los datos. Como esto representaría una inversión de tiempo considerable, se puede optar por utilizar tablas con el valor más normal de consumo de los diferentes aparatos, como la que os adjuntamos a continuación.

Los consumos los dividiremos en dos categorías:

1) Aparatos de uso variable: son aquellos que se utilizan unas horas determinadas al día, cuando el usuario los conecta. El consumo que tendremos será el producto de su potencia en watts (W), que es la indicada en la figura 53, por las horas (h) diarias de funcionamiento previstas.

Figura 53. Potencia eléctrica de los aparatos domésticos de uso variable

Aparato	Potencia (W)	Aparato	Potencia (W)
Bombilla de incandescencia	25-100 (60)	**Receptor de radio**	35-50
Bombilla de bajo consumo	9-20 (15)	**Batidora**	200-300

Aparato	Potencia (W)	Aparato	Potencia (W)
Fluorescente	4-58 (36)	Extractor de cocina o de baño	50-70
Bombilla halógena	15-300	Reproductor de vídeo	30-45
Televisor	50-150	Plancha	800-2.000
Radio	10-25	Aspirador	300-600
Casete	35-50	Ordenador	100-150
Tocadiscos	100-200	Monitor en color	100-200
Bomba de agua	70-500	Impresora	15-25
Secador de pelo	500-2.000	Módem telefónico	15-30
Ventilador	25-50	Tostadora	500-1.000
Cocina eléctrica	2.000-7.000	Microondas	500-700
Horno eléctrico	1.500-2.500	Exprimidor de naranjas	30-160
Licuadora	200	Cafetera eléctrica	600-1.100
Freidora	1.400-2.100		

2) Aparatos de uso continuo: el uso de estos aparatos es continuo durante todo el día, o por ciclos, como es el caso de la lavadora. En la figura 54 se adjuntan algunos valores de estos consumos

Figura 54. Energía eléctrica consumida por los aparatos domésticos de uso continuo

Aparato	Energía (Wh/día)	Aparato	Energía (Wh/día)
Radioteléfono	150	Amplificador de antena	125-150
Lavadora en frío	400/lavado	Contestador automático	175-250
Lavadora 90 °C (5 kg)	1.800-2.500/lavado	Radiorreloj	65-100
Lavavajillas (14 servicios)	1.300-1.700/lavado	Ambientador eléctrico	20-30
Secadora 5 kg	3.200-3.500/secado	Antimosquitos eléctrico	20-30
Nevera normal (combi, 300 l)	1.700-2.500	Nevera normal (300 l)	800-1.500
Nevera de bajo consumo (combi, 300 l)	800-1.200	Congelador normal (300 l)	1.500-2.000
Nevera de bajo consumo (300 l)	300-400	Congelador de bajo consumo (250 l)	650-800

Aparte de estos dos grupos de consumos, y sobre todo para el cálculo del consumo de vuestra casa, es muy importante que tengáis en cuenta los denominados *consumos fantasmas*. Éstos son los consumos que se generan de manera completamente inconsciente, y sobre todo se deben al modo en espera o *stand-by* de los aparatos. Estos consumos, que pueden parecer insignificantes, tienen una repercusión notable en el consumo global, y se dice que ¡represen-

tan entre el 2 y el 5% de la energía mundial consumida! Todo ello nos lo ahorraríamos si apagásemos los aparatos totalmente o si conectásemos un conjunto de aparatos a una regleta con interruptor y la apagásemos cuando dejáramos de usarlos. Actualmente ya existe una normativa que en un futuro prohibirá la comercialización de los aparatos que tengan este tipo de consumo. Para que los podamos determinar, os adjuntamos la tabla de la figura 55, de la que podréis extraer los valores más comunes de estos consumos.

Figura 55. Energía eléctrica diaria de los "consumos fantasmas"

TV apagada, en estado de "encendido remoto"	300 Wh/día
Vídeo	260 Wh/día
Horno de microondas con reloj	160 Wh/día
Alimentadores de pequeños aparatos	200 Wh/día
Equipo de sonido con control remoto	160 Wh/día
Caldera de gas con encendido electrónico	250 Wh/día
Alarma doméstica	160 Wh/día
Teléfono con alimentación eléctrica	240 Wh/día
Fax sin funcionar pero activado	240 Wh/día

En la figura 55, la unidad Wh/día significa la energía en watts hora (Wh) que consume un aparato en un día.

Para las instalaciones solares fotovoltaicas se desaconseja completamente el uso de aparatos de calefacción eléctrica: hornos eléctricos, microondas, radiadores eléctricos, termos eléctricos, lavadoras de agua caliente, secadoras, etc. Será necesario buscar alternativas a estos consumos para las instalaciones solares fotovoltaicas autónomas.

Actividad

Para calcular vuestro consumo, situad estos aparatos, si los utilizáis, en una zona separada de la tabla de cálculo para ver qué repercusión tienen en el consumo global y cómo variará el dimensionado de la instalación si los tenéis en cuenta o no.

A partir de los datos de las figuras precedentes, elaborad una tabla como la que se adjunta y caracterizad vuestro consumo diario. Esto sería lo que haríamos para determinar la demanda futura de nuestro sistema.

Consumos variables				
Aparato	**Núm. de aparatos**	**Potencia (W)**	**Tiempo (h/día)**	**Energía (Wh/día)**
Total consumos variables				
Consumos continuos				
Aparato	**Núm. de aparatos o servicios/día**	**Energía (Wh/día o servicio)**		**Energía (Wh/día)**
Total consumos continuos				

Consumos fantasmas				
Aparato	**Núm. de aparatos o servicios/día**	**Energía (Wh/día o servicio)**		**Energía (Wh/día)**
Total "consumos fantasmas"				
Total consumo diario previsto				

6.2.2. Cálculo de la energía necesaria

Una vez hayáis determinado el consumo diario previsto, le aplicaremos un factor global para determinar la energía que deberán suministrar los módulos fotovoltaicos. Como el rendimiento de los diferentes elementos que componen la instalación fotovoltaica (regulador, inversor y baterías) no es del 100%, el valor de la energía diaria que han de suministrar los módulos fotovoltaicos siempre será superior al valor del consumo diario previsto.

Para determinar el rendimiento de la instalación, utilizaremos un valor estándar de rendimiento global, que será del 75% para las instalaciones que dispongan de suministro de corriente alterna y del 80% para las instalaciones que dispongan de suministro de corriente continua (que es más alto porque no tienen inversor).

De este modo, para efectuar el cálculo dividiremos el total del consumo diario que hemos obtenido en el apartado anterior por el rendimiento de la instalación. La expresión matemática será:

$$\textit{Energía necesaria} = \textit{Consumo diario previsto} \,/\, \textit{Rendimiento global instalación} \quad (48)$$

Ejemplo de dimensionado (I): planteamiento del cálculo

Comencemos a desarrollar nuestro ejemplo (vosotros deberéis hacerlo con los valores que obtengáis del cálculo de la instalación necesaria en vuestra casa). Si en el subapartado 6.2.1 tenemos una demanda de 1.850 Wh y disponemos de una instalación que funciona con corriente alterna (y, por tanto, con un rendimiento del 75%), la energía necesaria, y que deberá aportar el conjunto de módulos fotovoltaicos, será de 2.467 Wh.

De esta manera hemos obtenido la energía necesaria para nuestra instalación.

6.2.3. Radiación solar disponible

Una vez determinada la demanda que hemos de satisfacer con los módulos fotovoltaicos, deberemos cuantificar el recurso que tendremos, es decir, la radiación solar incidente.

Como en el caso de las instalaciones fotovoltaicas autónomas se quiere disponer de energía eléctrica durante todos los días del año, utilizaremos como valor de radiación solar incidente el correspondiente al momento de menos radiación: el mes de diciembre o solsticio de invierno. Lo hacemos así porque nos queremos asegurar de que cubrimos la demanda en la peor situación del año, cuando la radiación solar incidente es más baja. Así, si para este día la producción eléctrica es suficiente para satisfacer la demanda, seguro que lo será para el resto de los días del año.

Para conocer el valor de la radiación solar incidente, recurriremos a las tablas de radiación global diaria del emplazamiento. Los valores de la radiación solar incidente se presentan en tablas como la que se adjunta en la figura 56, extraída del *Atles de radiació solar de Catalunya* y que corresponde a la ciudad de Barcelona.

Figura 56. Tabla de la radiación solar incidente para la ciudad de Barcelona

Radiació solar global diària sobre superfícies inclinades (MJ/m²/dia). Estació: Barcelona

Orientació: 0°													
Inclinació	Gen	Feb	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Des	Anual
0°	6,80	9,65	13,88	18,54	22,25	24,03	23,37	20,42	16,05	11,40	7,73	6,04	15,04
5°	7,70	10,56	14,72	19,15	22,58	24,21	23,63	20,93	16,85	12,32	8,66	6,94	15,71
10°	8,56	11,41	15,47	19,67	22,78	24,25	23,74	21,31	17,54	13,17	9,55	7,80	16,29
15°	9,37	12,19	16,14	20,07	22,84	24,13	23,70	21,59	18,13	13,95	10,38	8,61	16,78
20°	10,12	12,90	16,70	20,35	22,76	23,87	23,52	21,76	18,61	14,63	11,15	9,37	17,17
25°	10,81	13,52	17,17	20,51	22,60	23,48	23,24	21,80	18,98	15,23	11,85	10,07	17,46
30°	11,43	14,07	17,52	20,54	22,32	23,02	22,86	21,71	19,23	15,73	12,47	10,71	17,65
35°	11,97	14,52	17,77	20,45	21,90	22,43	22,34	21,48	19,36	16,13	13,01	11,28	17,73
40°	12,44	14,88	17,91	20,23	21,35	21,70	21,69	21,12	19,37	16,43	13,47	11,77	17,71
45°	12,83	15,15	17,94	19,89	20,67	20,84	20,90	20,63	19,26	16,63	13,85	12,19	17,58
50°	13,14	15,32	17,86	19,43	19,87	19,86	20,00	20,02	19,03	16,72	14,13	12,53	17,33
55°	13,36	15,40	17,67	18,85	18,95	18,77	18,97	19,29	18,68	16,71	14,32	12,78	16,98
60°	13,49	15,37	17,36	18,16	17,92	17,60	17,84	18,44	18,22	16,59	14,42	12,95	16,53
65°	13,53	15,25	16,95	17,36	16,83	16,41	16,71	17,48	17,65	16,36	14,42	13,04	16,00
70°	13,49	15,03	16,44	16,46	15,70	15,14	15,48	16,43	16,97	16,03	14,33	13,03	15,38
75°	13,35	14,72	15,83	15,47	14,48	13,78	14,18	15,35	16,19	15,60	14,14	12,94	14,67
80°	13,13	14,31	15,12	14,41	13,18	12,36	12,80	14,17	15,31	15,08	13,86	12,77	13,87
85°	12,82	13,81	14,32	13,29	11,82	10,93	11,35	12,93	14,34	14,45	13,50	12,51	13,00
90°	12,43	13,23	13,44	12,11	10,41	9,57	9,99	11,62	13,30	13,74	13,04	12,16	12,08

Enlaces de interés

El *Atles de radiació solar de Catalunya* se puede descargar de:

- http://www20.gencat.cat/docs/icaen/Migracio%20automatica/Documents/Activitats%20i%20dades%20energetiques/Arxius/monografic12.pdf

Para otros emplazamientos, podéis consultar el *Atlas de radiación solar en Europa*:

- http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps/radmonth.php

Para obtener los valores de radiación solar incidente, será necesario que tengamos en cuenta dos factores:

1) La orientación del módulo respecto al sur: en el hemisferio norte, la orientación con más radiación es hacia el sur. Cuando el módulo solar esté orientado completamente al sur, tendremos un ángulo de orientación de 0°. Para las otras orientaciones que no sean exactamente hacia el sur, deberemos decir qué ángulo tenemos respecto a éste (por ejemplo, 45° si se trata de una orientación sudeste o sudoeste, o 90° si es una orientación este u oeste, etc.). La radiación es la misma si estamos orientados hacia el este o hacia el oeste, y sólo nos importa el valor absoluto del ángulo. En la tabla de la figura 56, la orientación es de 0°, es decir, los valores son válidos para los módulos orientados completamente hacia el sur.

2) La inclinación del módulo respecto a la horizontal: también será necesario tener en cuenta el ángulo del módulo con la tierra. Si el módulo se encuentra paralelo a la tierra, tendremos una inclinación de 0°. A medida que levantemos el módulo, tendremos ángulos diferentes, hasta llegar a un máximo de 90°, que sería el caso de un módulo colocado en una pared. Fijaos en que en la tabla de la figura 56 cada fila indica un grado de inclinación diferente de los módulos.

Si observáis los valores de la tabla de la figura 56, podréis apreciar que el mes más desfavorable es el mes de diciembre y que, por tanto, la inclinación que elegiríamos sería de 65°. Así maximizamos la energía solar incidente para este mes.

Para las instalaciones conectadas a la red no se buscará cubrir el día de condiciones más desfavorables, sino que se buscará la producción máxima anual. Será necesario, por tanto, ver qué inclinación capta más radiación solar incidente en todo el año. Si volvemos a la radiación de la ciudad de Barcelona (figura 56), vemos que la inclinación ideal en este caso sería de 35°.

Ejemplo de dimensionado (II): valores de radiación

Continuando con nuestro ejemplo de dimensionado, tomaremos el valor de radiación solar en Barcelona y elegiremos una inclinación de 65°, como para una planta solar fotovoltaica autónoma.

Observad que los datos de radiación de las tablas vienen expresados en megajulios (MJ) por metro cuadrado y día. Este valor nos indica la energía total diaria que incide en una superficie.

Los fabricantes de módulos fotovoltaicos, en cambio, expresan la producción de los módulos en watts pico (W_p). Este valor expresa la potencia del módulo para una radiación estándar de potencia 1.000 W/m^2. Para poder efectuar los cálculos, lo que haremos será calcular las horas de sol pico equivalentes. ¿Qué queremos decir? Pues que, a partir de la energía de la radiación solar incidente, calcularemos el número de horas equivalentes que necesitamos para que una radiación de potencia de 1.000 W/m^2 nos dé la misma energía. Este valor nos servirá para calcular, en el subapartado 6.2.4, el número de módulos necesarios.

Para convertir la energía de la radiación solar incidente de las tablas de la figura 56 en horas de sol pico equivalentes, realizaremos los pasos siguientes:

1) Pasamos la energía de radiación de MJ/m^2/día a kWh/m^2/día, teniendo en cuenta que 3,6 MJ equivalen a 1 kWh. Dividiremos, pues, el valor de la radiación por 3,6.

Por ejemplo, en nuestro caso tenemos una radiación de 13,04 MJ/m^2/día, que equivale a 3,62 Wh/m^2/día.

2) Calculamos las horas de sol pico equivalentes, dividiendo la energía de radiación que hemos obtenido en el anterior apartado por la potencia de radiación estándar de calibrar los módulos. Este valor suele ser de 1.000 W/m^2, pero deberemos comprobar en la hoja de características técnicas del módulo (descritas en el subapartado 6.1.1) que el valor de radiación para el cual se han obtenido los resultados es de 1.000 W/m^2. Así tendremos:

$$\textit{Horas de sol pico, HSP} \text{ (h)} = \textit{Energía radiación de las tablas} \text{ (kWh/m}^2\text{/día)} / \textit{Potencia de calibrado de los módulos} \text{ (kW/m}^2\text{)} \quad (49)$$

En nuestro caso, dividimos 3,62 kWh/m^2/día por 1 kW/m^2 (= 1.000 W/m^2) y obtenemos un valor de 3,62 horas de sol pico al día.

De esta manera habremos obtenido, a partir de las tablas de radiación solar incidente y de la hoja de características técnicas del módulo fotovoltaico que utilizamos, el número de horas equivalentes de radiación solar incidente a 1.000 W/m^2, que nos indica la energía que tendremos disponible para nuestra instalación.

6.2.4. Número de módulos fotovoltaicos necesarios

Una vez tenemos la demanda diaria que cubrir y las horas de sol pico equivalentes para la radiación solar incidente del emplazamiento de la instalación, pasamos a calcular el número de módulos necesarios.

El cálculo del número de módulos es lo más importante, ya que determinará el cálculo del resto de los componentes y también nos determinará el coste de la instalación.

Para saber el número de módulos, realizaremos uno de los dos cálculos que os detallamos a continuación, en función del tipo de uso de la planta:

Para instalaciones de uso diario, realizaremos el cálculo a partir de los datos obtenidos en los subapartados 6.2.1, 6.2.2 y 6.2.3, de la manera siguiente:

$$\textit{Número de módulos} = \textit{Energía necesaria} \text{ (Wh/día)} / (\textit{Potencia pico del módulo} \text{ (W}_p\text{)} \cdot \eta_{campo} \cdot \textit{Radiación solar} \text{ (HSP/día)}) \quad (50)$$

2) Para instalaciones de fin de semana, realizaremos el cálculo también a partir de los datos obtenidos en los subapartados 6.2.1, 6.2.2 i 6.2.3, pero en este caso supondremos tres días de demanda a la semana. Así, la ecuación queda de la manera siguiente:

$$\textit{Número de módulos} = 3 \cdot \textit{Energía necesaria} \text{ (Wh/día)} / (\textit{Potencia pico del módulo} \text{ (W}_p\text{)} \cdot \eta_{campo} \cdot 7 \; \textit{Radiación solar} \text{ (HSP/día)}) \quad (51)$$

Watts pico

Los watts pico (W_p) son equivalentes a los watts eléctricos normales, pero se utilizan en el campo de la energía fotovoltaica para indicar la potencia máxima (pico) que podemos obtener de los módulos.

De estas ecuaciones, los dos términos que aún no conocemos son:

a) la potencia pico del módulo la obtendremos de la hoja técnica que elabora el fabricante, como se muestra por ejemplo en la figura 57. En la hoja del fabricante vemos los diferentes tipos de módulos en columnas (IS-165, IS-170, IS-175, IS-180) con los valores característicos obtenidos por el fabricante en los ensayos de laboratorio y explicados en el subapartado 6.1.1 (V_{oc}, I_{cc}, I_{pmp}, V_{pmp} y $P_{máx}$).

Figura 57. Datos técnicos de un módulo fotovoltaico de Isofotón

COMPORTAMIENTO BAJO CONDICIONES ESTÁNDAR DE PRUEBA	IS-165	IS-170	IS-175	IS-180
POTENCIA ELÉCTRICA MÁXIMA (P_{max})	165	170	175	180
TENSIÓN EN CIRCUITO ABIERTO (V_{oc})	44,3	44,6	44,8	45,2
TENSIÓN EN EL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA (V_{mpp})	35,6	35,7	36,2	36,5
CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO (I_{sc})	5,0	5,13	5,20	5,30
CORRIENTE EN EL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA (I_{mpp})	4,64	4,77	4,84	4,93
EFICIENCIA (%)	13,1%	13,4%	13,8%	14,2%
TOLERANCIA DE POTENCIA (%P_{max})	±3%	±3%	±3%	±3%

Datos medidos en simuladores solares Clase A, según IEC-60904-9 Ed.2, certificado por TÜV Rheinland

b) el *rendimiento del campo de captadores* (η_{campo}) es el valor que incluirá en el cálculo las pérdidas que se dan en la instalación, por la suciedad de los módulos, la tolerancia del fabricante, etc. Este rendimiento tendrá un valor de entre 0,70 y 0,80.

El símbolo η corresponde a la letra griega eta minúscula.

Así pues, a partir de estos valores podremos obtener el número de módulos necesarios para nuestra instalación, en función de la demanda y de la radiación solar incidente.

Ejemplo de dimensionado (III): cantidad de paneles

Continuemos ahora con el dimensionado de la instalación necesaria para vuestra casa calculando el número de paneles necesarios. Si seguimos con los datos que teníamos en el ejemplo:

- hemos de producir una energía de 2.467 Wh (subapartado 7.2.2);
- el mes más desfavorable tenemos 3,62 HSP (subapartado 7.2.3);
- consideraremos que utilizamos los módulos IS-170 de la tabla de la figura 57, que nos dan una potencia pico de 170 Wp, y
- supondremos que nuestra instalación es de uso diario, por tanto, usamos la ecuación 50.

Así, el número de módulos estará entre los siguientes márgenes:

$$\textit{Núm. módulos} = 2.467\ \text{Wh} / (170\ \text{Wp}\ \ 0{,}7\ \ 3{,}62\ \text{h}) = 5{,}73 \quad (52)$$

$$\textit{Núm. módulos} = 2.467\ \text{Wh} / (170\ \text{Wp}\ \ 0{,}8\ \ 3{,}62\ \text{h}) = 5{,}01 \quad (53)$$

Como debemos seleccionar un número entero de módulos, elegiremos seis, ya que un número par de módulos siempre ayuda a hacer más sencilla la conexión de campo de éstos. Además, si elegimos cinco módulos no cubriremos la solicitada.

6.2.5. Capacidad del sistema de acumulación: número de baterías

El conjunto de baterías forma el sistema de acumulación de la instalación. Por lo tanto, tiene la doble función de almacenar energía diaria para satisfacer la demanda en horas en las que no hay producción y también deberá aportar energía los días en los que ésta no se genere (por mal tiempo, por ejemplo).

Por ello, el factor más importante que deberemos tener en cuenta es el nivel de autonomía que queremos asumir con la instalación.

Los criterios que os proponemos para determinar los días de autonomía son los siguientes:

- de 7 a 15 días para instalaciones totalmente autónomas de difícil acceso, en las que deberemos tener tantos días de autonomía como días sucesivos de nubes que muestren las estadísticas meteorológicas de la zona;
- de 4 a 6 días para sistemas de electrificación rural de uso diario. Podremos reducir este valor a 3 días si disponemos de un generador o grupo electrógeno de arranque automático, y
- de 2 a 3 días para la electrificación de viviendas de fin de semana.

Para calcular la capacidad del sistema de baterías, aplicaremos la expresión siguiente:

$$\textit{Capacidad de la batería}\ (\text{Ah}) = (\textit{Energía necesaria}\ (\text{Wh}) \cdot \textit{Días de autonomía}) \ / \ (\textit{Voltaje de les baterías}\ (\text{V}) \cdot \textit{Profundidad de descarga de la batería}) \quad (54)$$

Para saber la profundidad de descarga de la batería, deberemos seguir las indicaciones del fabricante de baterías, pero si no las tenemos podemos aplicar los baremos siguientes:

- de 0,6 a 0,8 para acumuladores estacionarios de alto volumen de electrolito;
- de 0,4 a 0,5 para acumuladores de tipo monobloque;
- de 0,2 a 0,3 para acumuladores de arranque de automóvil (que si bien no son muy recomendables, hay instalaciones que los utilizan).

La profundidad de descarga de las baterías, es decir, el nivel porcentual de carga mínima que puede alcanzar un acumulador, la hemos descrito en el subapartado 6.1.2.

Así, a partir de los valores del fabricante y de los días de autonomía que necesitamos, determinaremos el número de baterías necesarias de nuestra instalación.

Ejemplo de dimensionado (IV): cantidad de baterías

Calculemos, para nuestro ejemplo, la capacidad necesaria de las baterías. Para hacerlo utilizaremos los datos técnicos de unas baterías de tipo monobloque que se adjuntan en la tabla 58. En esta tabla vemos, en la primera columna, los diferentes modelos disponibles de baterías; en la segunda, la tensión nominal de cada una, y en la tercera, dos posibles capacidades de carga (C_p) que hemos descrito en el apartado 6.1.2: una para una descarga de 10 h y otra para una descarga de 100 h. Como veis, con la descarga rápida (10 h) siempre tenemos un valor de C_p menor que con la de 100 h. El resto de las columnas indican las dimensiones de las baterías y el peso.

Figura 58. Datos técnicos de diferentes modelos de batería de tipo monobloque (Isofotón)

MODELO	Tensión (V)	Capacidad a 25 °C (Ah)		Longitud (mm)	Amplitud (mm)	Altura (mm)	Peso con ácido (kg)
		10 h	100 h				
12.AV.45	12	33	45	221	176	277	20,8
12.AT.68	12	50	68	221	176	277	24,8
12.AV.90	12	66	90	311	176	277	33,7
12.AV.136	12	100	136	389	176	277	45,6
12.AV.158	12	116	158	469	176	277	53,5
12.AV.204	12	150	204	553	176	277	65,5
6.AT.244	6	189	244	284	229	332	45,8
6.AT.279	6	216	279	284	229	332	48,7
6.AT.314	6	243	314	284	229	332	51,6

Los valores que utilizaremos serán la energía necesaria (2.467 Wh), los días de autonomía (5 días), el voltaje de la batería (12 V) y el valor de profundidad de descarga (0,45). Si sustituimos estos valores en la ecuación 6.10, obtenemos que la capacidad de descarga es:

$$\textit{Capacidad de descarga} = (2.467 \cdot 5) / (12 \cdot 0{,}45) = 2.284 \text{ Ah}_{c100} \quad (55)$$

El valor de la capacidad de descarga se expresa en amperios hora y un subíndice c100 que indica que esta capacidad de la batería la tendremos para un ciclo de descarga de 100 h. Con esta descarga, las cualidades de la mayoría de baterías se mantienen, por lo que será el ciclo de descarga que utilizaremos para hacer los cálculos.

En nuestro caso, y teniendo en cuenta los diferentes modelos que aparecen, seleccionaríamos el modelo 12.AV.204, ya que es el más grande y así tendríamos menos unidades. Si consideramos que la capacidad es de 204 Ah_{c100}, tal y como podemos ver en la tabla de la figura 58, al realizar el cálculo tenemos que:

$$\textit{Número de baterías} = 2.284 \text{ Ah}_{c100} / 204 \text{ Ah}_{c100} = 11{,}19 \quad (56)$$

Así, necesitaremos doce baterías de este modelo (el número entero inmediatamente superior al obtenido).

Ah

Ah son amperios hora.

Capacidad de una batería

El valor de la capacidad de descarga se expresa en amperios hora y un subíndice c100, que indica que esta capacidad de la batería la tendremos para un ciclo de descarga de 100 h.

6.2.6. Selección de los demás elementos de la instalación

Aparte de los elementos principales de la instalación, que son los paneles solares y las baterías, es necesario determinar el resto de los elementos que forman la instalación y que hemos descrito en el subapartado 6.1: el regulador, el inversor, el cableado y las protecciones.

En este apartado los dimensionaremos para nuestro ejemplo, que recordad que consta de seis módulos fotovoltaicos del modelo 170 y de doce baterías del modelo 12.AV.204.

Paralelamente, podéis hacer los cálculos para vuestra instalación.

El regulador

Para seleccionar el regulador, tendremos en cuenta la intensidad máxima que puede soportar, que está determinada por la intensidad máxima que puede generar el campo de módulos fotovoltaicos. De esta manera, el cálculo que haremos será:

$$\textit{Intensidad máxima del regulador} > 1{,}10 \ \textit{intensidad máxima del campo de módulos} \tag{57}$$

El valor 1,10 de la ecuación 57 es simplemente un factor de seguridad que se toma para asegurarse de que no se llega nunca al límite de la intensidad.

Ejemplo de dimensionado (V): elección del regulador

Si hacemos el cálculo para nuestro ejemplo, el número de módulos es seis y, para facilitar su montaje, haremos tres grupos en paralelo de dos módulos en serie. Si miramos las especificaciones del módulo fotovoltaico de la figura 57, vemos que, para el modelo 170, la intensidad máxima es 5,13 A. Por lo tanto, según esta configuración, tendremos:

$$I_{max} > 1{,}10 \cdot 5{,}13 \cdot 3 = 16{,}93 \text{ A} \tag{58}$$

Los reguladores tienen intensidades máximas de 10, 15, 20 y 25 A. En nuestro caso, elegiremos un regulador de 20 A de intensidad máxima como mínimo, que es la intensidad inmediatamente posterior a la intensidad que hemos obtenido.

El inversor

Para seleccionar el inversor, el parámetro clave será la potencia máxima de consumo que podemos tener. Es decir, la demanda máxima simultánea que habrá en el hogar.

Respecto al cálculo, lo que hacemos es sumar todas las potencias de los aparatos que hemos enunciado en subapartado 6.2.1 y aplicarles un factor. Este fac-

tor se conoce como **coeficiente de simultaneidad**, e indica el porcentaje del total de la potencia instalada que debemos emplear simultáneamente. Así, la potencia del inversor que seleccionaremos será:

$$\text{Potencia del convertidor} < (\text{Suma de la potencia nominal de todos los aparatos de consumo}) \cdot 0{,}75 \quad (59)$$

$$\text{Potencia del convertidor} > (\text{Suma de la potencia nominal de todos los aparatos de consumo}) \cdot 0{,}5 \quad (60)$$

Es decir, la potencia estará contenida entre el 50 y el 75% de la potencia nominal de todos los aparatos de consumo, y estadísticamente se ha calculado que es la potencia máxima que se utiliza de una instalación eléctrica.

Esta operación nos determinará el rango de potencia en el que debemos seleccionar al inversor.

Si en nuestro caso tenemos un aparato con una potencia unitaria, por si solo, superior al valor obtenido, deberemos considerar que esta potencia es la de diseño del inversor. O, lo que es lo mismo, cuando obtengamos el valor de potencia deberemos asegurarnos de que no existe ningún aparato eléctrico en nuestra instalación con una potencia superior.

Ejemplo de dimensionado (VI): elección de un inversor

Continuando con nuestro ejemplo, supongamos que la potencia total instalada que hemos obtenido de las tablas del subapartado 6.2.1 es de 3.850 W (debemos sumar la potencia de los consumos ocasionales y la de los continuos). Por lo tanto, la potencia de nuestro inversor deberá cumplir, según las ecuaciones 34 y 35:

$P_{\text{convertidor}} < 2.887{,}5$ W
$P_{\text{convertidor}} > 1.925$ W

Así pues, elegiremos un inversor que tenga 2.000 o 2.500 W de potencia máxima en función de los modelos disponibles en el catálogo del fabricante.

Si en nuestra instalación tenemos un horno eléctrico con una potencia de 3.000 W, deberemos comprar un convertidor que admita esta potencia máxima. Dado que esto aumentará el coste del convertidor, puede ser conveniente intentar plantear alternativas (por ejemplo, en este caso, un horno de gas).

Cableado y protecciones

Finalmente, el cableado y las protecciones que seleccionaremos serán las mismas que para una instalación normal de corriente alterna, por ejemplo de nuestra casa. Así, para calcular estos parámetros seguiremos las indicaciones del Reglamento electrotécnico para baja tensión, o la normativa estatal que se aplique. El cálculo de estos elementos queda fuera del alcance de esta asignatura.

6.3. Sistemas híbridos fotovoltaico-eólicos

Para acabar con este apartado, y a modo de conclusión, indicaremos que en algunos casos se pueden construir sistemas híbridos. Estos sistemas no serán exclusivamente fotovoltaicos o eólicos, sino que pueden tener una combinación de las dos fuentes renovables.

Ciertamente, el viento y la radiación solar son dos factores que se complementan muy bien: en verano, cuando la radiación es elevada, el viento es casi nulo. En invierno, o cuando está nublado y hace mal tiempo, el viento está presente y la radiación solar no.

Un buen planteamiento puede ser, por lo tanto, desarrollar sistemas híbridos para electrificar de manera más fiable uno o varios hogares. Estos sistemas serán especialmente interesantes para electrificar pequeñas comunidades.

Con un pequeño aerogenerador podemos reducir notablemente la superficie de los captadores solares. La figura 59 muestra la imagen de una instalación de este tipo.

Figura 59. Sistema de electrificación rural híbrido: eólica y solar



Fuente: Soliclima (http://www.soliclima.es)

6.4. ¿Qué hemos aprendido?

Hemos estudiado los elementos principales que forman una instalación solar fotovoltaica autónoma, sus características y cómo dimensionarlos. Hemos calculado también una instalación para nuestra casa, ¡y ello nos ayuda a ver las necesidades de energía que tenemos!

La energía fotovoltaica no es la única que puede servir para obtener energía en zonas o construcciones que no tengan acceso a la red eléctrica. Continuaremos, pues, con unas indicaciones sobre los sistemas generadores aislados.

7. Sistemas generadores aislados

Hasta ahora hemos analizado el sistema eléctrico, el que conforma la red eléctrica, y las energía renovables. También hemos estudiado los sistemas autónomos fotovoltaicos, que sirven para electrificar zonas que no tienen acceso a la red. En este apartado os describiremos aquellos sistemas que también son capaces de generar electricidad, pero que no lo hacen conectados a la red, sino que son sistemas autónomos.

¿Qué aprenderemos?

Veremos diferentes alternativas de electrificación para zonas o construcciones que no tengan acceso a la red eléctrica.

¿Qué supondremos?

Supondremos que tenéis conocimientos sobre electrificación y conversión de energía, como los que hemos detallado en los apartados anteriores.

7.1. Sistemas generadores aislados

¿Por qué son necesarios los sistemas de generación eléctrica autónoma? Aunque nos pueda parecer que la red eléctrica está extendida por todo el territorio y que ya no tiene sentido plantearse alimentaciones autónomas, hay muchos casos en los que esta opción es necesaria. ¿Cuáles? Por ejemplo, los dos casos que os mostramos a continuación, para los que también describimos brevemente los motivos de electrificación autónoma:

- Masías o pueblos alejados de la red eléctrica: existen ciertos núcleos de población localizados en zonas remotas del territorio. Los accesos son difíciles, apenas cuentan con población fija y, en su momento, la compañía eléctrica no alargó la red eléctrica hasta el pueblo. En estos casos, la alternativa de generación aislada es a menudo atractiva, tanto económicamente como respecto a fiabilidad.

- Obras y actuaciones puntuales: en muchos casos se llevan a cabo trabajos de construcción puntuales en lugares urbanos o rurales en los que no existe red eléctrica a la que nos podamos conectar. A veces, pese a existir una red, las autorizaciones para la conexión temporal son largas y se prefiere, para ahorrar tiempo, optar por una generación autónoma. Seguramente habréis visto los generadores móviles de corriente eléctrica que hay en muchas obras (también conocidos como "burras"). Son unos remolques amarillos que disponen de ruedas para poderlos arrastrar y que se utilizan para hacer

funcionar distintas máquinas eléctricas de ejecución de obras (sierras, radiales, etc.).

Aparte de éstos puede haber otros casos, como las ferias o las atracciones puntuales, los mercados de artesanías, las fiestas musicales en las plazas, los conciertos, etc.

Por lo tanto, en muchos casos habrá una demanda de energía eléctrica que no podremos satisfacer con la red eléctrica. Para ellos deberemos encontrar una solución:

- Si necesitamos una solución temporal, sólo para un período relativamente corto, y disponemos de combustible, optaremos por un generador diésel o de gasolina.

- Si necesitamos una solución más definitiva, para tener energía continuamente y a un precio asequible, y además no disponemos de un acceso fácil o de un suministro próximo de gasolina o gasóleo, optaremos por sistemas autónomos de energías renovables. Pueden estar formados por energía eólica, solar, fotovoltaica, biomasa o una combinación de éstas.

7.2. ¿Qué hemos aprendido?

Hemos visto que existen diferentes opciones de electrificación para las zonas sin acceso a la red y que el mejor sistema de electrificación dependerá de los costes y del tipo de solución que necesitemos, si debe ser temporal o permanente.

8. Problemas resueltos

8.1. Enunciados

1) Decid cuál de las afirmaciones siguientes es verdadera o falsa:

a) La entropía de un sistema cerrado puede disminuir.
b) La entropía de una masa determinada disminuye en toda compresión isoterma.
c) La energía interna y la entropía son función exclusivamente de la temperatura.

2) Un kilogramo de oxígeno pasa de los 300 K y 2 bares de presión hasta los 1.500 K y 1,5 bares. Después se somete a una compresión isoterma y finalmente pasa por un proceso isoentrópico. Al final vuelve al estado inicial:

a) Deducid cómo será la entropía en los diferentes procesos. ¿Aumenta o disminuye?
b) Dibujad el diagrama *T*-*S* correspondiente al proceso.

3) Calculad la energía anual teórica que podréis obtener de un aerogenerador de 80 m de diámetro, a partir de la curva de potencia de la figura 60 y considerando la curva de frecuencias del viento de la zona.

Calculad también el coeficiente de potencia máximo de este aerogenerador y decid si se trata de un buen aerogenerador o no.


Figura 60. Hoja de características técnicas del aerogenerador

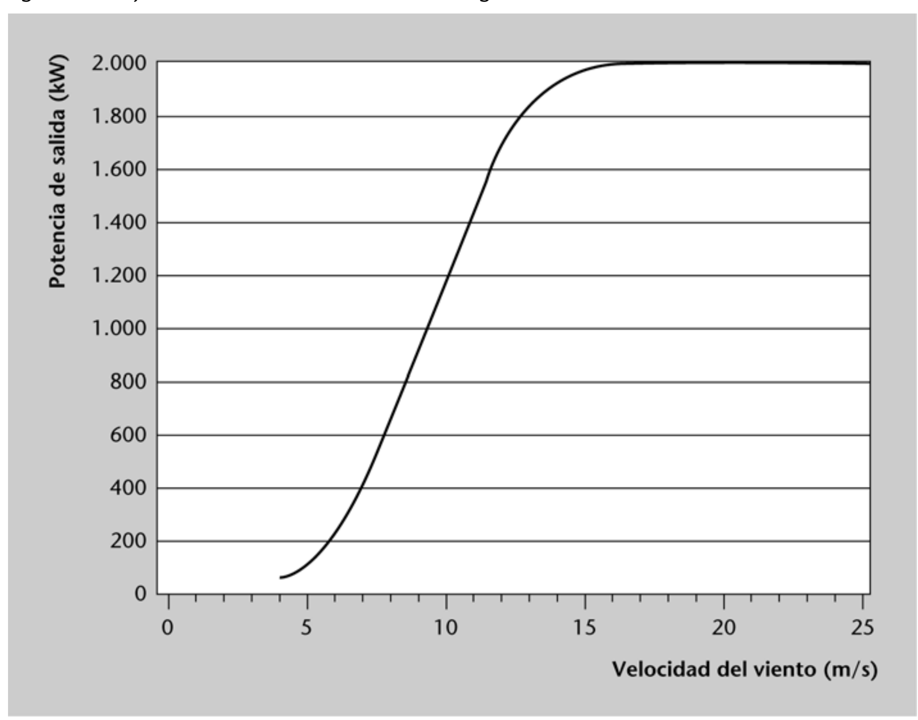
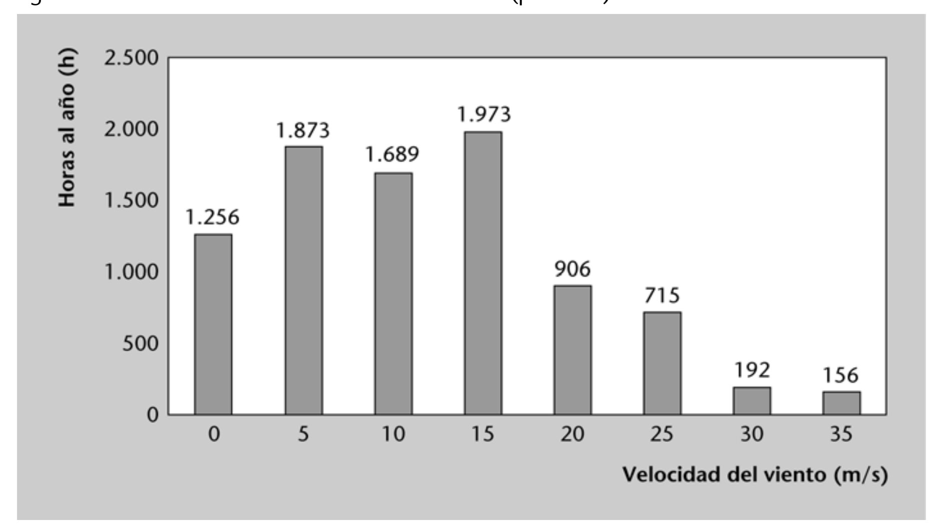


Figura 61. Curva de frecuencia del viento de la zona (previsión)



4) En una masía rural aislada, unos amigos vuestros quieren instalar un sistema de energía fotovoltaica para tener electricidad durante los meses de verano (de junio a septiembre). Los aparatos de los que quieren disponer son: doce puntos de luz, televisión y vídeo, radio, batidora, ordenador, lavadora, nevera combi y microondas. Como tenéis algunas nociones de diseño de estos sistemas, os preguntan cuántos módulos fotovoltaicos y cuántas baterías necesitarán. Os adjuntamos las características técnicas de los módulos fotovoltaicos y de las baterías, además de la tabla de radiación solar del municipio.

Figura 62. Características de los módulos fotovoltaicos

COMPORTAMIENTO BAJO CONDICIONES ESTÁNDAR DE PRUEBA	IS-165	IS-170	IS-175	IS-180
POTENCIA ELÉCTRICA MÁXIMA (P_{max})	165	170	175	180
TENSIÓN EN CIRCUITO ABIERTO (V_{oc})	44,3	44,6	44,8	45,2
TENSIÓN EN EL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA (V_{mpp})	35,6	35,7	36,2	36,5
CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO (I_{sc})	5,0	5,13	5,20	5,30
CORRIENTE EN EL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA (I_{mpp})	4,64	4,77	4,84	4,93
EFICIENCIA (%)	13,1%	13,4%	13,8%	14,2%
TOLERANCIA DE POTENCIA (%P_{max})	±3%	±3%	±3%	±3%

Datos medidos en simuladores solares Clase A, según IEC-60904-9 Ed.2, certificado por TÜV Rheinland

Fuente: Isofotón

Figura 63. Tabla de baterías

Modelo	Tensión (V)	Capacidad a 25°C (Ah)		Longitud (mm)	Amplitud (mm)	Altura (mm)	Peso con ácido (kg)
		10 h	100 h				
12.AV.45	12	33	45	221	176	277	20,8
12.AT.68	12	50	68	221	176	277	24,8
12.AV.90	12	66	90	311	176	277	33,7
12.AV.136	12	100	136	389	176	277	45,6
12.AV.158	12	116	158	469	176	277	53,5
12.AV.204	12	150	204	553	176	277	65,5
6.AT.244	6	189	244	284	229	332	45,8
6.AT.279	6	216	279	284	229	332	48,7
6.AT.314	6	243	314	284	229	332	51,6

Fuente: Isofotón

Figura 64. Tabla de radiación solar ($MJ/m^2 \cdot día$)

Orientació: 0º													
Inclinació	Gen	Feb	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Des	Anual
0º	5,44	8,45	12,80	17,52	21,21	22,89	22,08	18,96	14,46	9,76	6,11	4,53	13,71
5º	6,05	9,21	13,56	18,10	21,54	23,08	22,34	19,44	15,17	10,49	6,73	5,06	14,26
10º	6,64	9,91	14,24	18,61	21,75	23,14	22,47	19,81	15,79	11,17	7,33	5,56	14,72
15º	7,19	10,56	14,84	19,00	21,82	23,06	22,46	20,06	16,31	11,78	7,88	6,03	15,10
20º	7,69	11,14	15,35	19,28	21,77	22,84	22,32	20,24	16,74	12,32	8,38	6,47	15,40
25º	8,15	11,66	15,77	19,45	21,63	22,49	22,06	20,29	17,07	12,79	8,84	6,87	15,61
30º	8,57	12,11	16,10	19,50	21,38	22,08	21,72	20,21	17,30	13,18	9,25	7,23	15,73
35º	8,93	12,48	16,32	19,43	21,00	21,54	21,26	20,02	17,42	13,49	9,60	7,54	15,77
40º	9,24	12,78	16,45	19,24	20,50	20,88	20,67	19,71	17,43	13,72	9,89	7,81	15,70
45º	9,49	13,00	16,48	18,94	19,87	20,09	19,96	19,27	17,34	13,87	10,12	8,03	15,55
50º	9,68	13,14	16,41	18,52	19,13	19,19	19,13	18,73	17,15	13,93	10,29	8,21	15,30
55º	9,81	13,19	16,23	18,00	18,28	18,18	18,20	18,07	16,85	13,90	10,40	8,33	14,96
60º	9,88	13,17	15,96	17,36	17,33	17,07	17,15	17,31	16,45	13,79	10,44	8,40	14,53
65º	9,89	13,06	15,59	16,63	16,30	15,97	16,09	16,45	15,95	13,60	10,42	8,41	14,03
70º	9,83	12,87	15,13	15,80	15,25	14,78	14,97	15,49	15,35	13,32	10,33	8,38	13,46
75º	9,72	12,60	14,58	14,88	14,11	13,51	13,76	14,51	14,67	12,97	10,18	8,29	12,81
80º	9,54	12,25	13,94	13,88	12,90	12,18	12,48	13,44	13,90	12,53	9,96	8,15	12,09
85º	9,31	11,83	13,22	12,85	11,62	10,81	11,15	12,31	13,06	12,02	9,69	7,96	11,31
90º	9,01	11,34	12,43	11,75	10,29	9,54	9,85	11,12	12,14	11,44	9,35	7,72	10,49

8.2. Soluciones

1)

a) Falsa. Según la propia definición de entropía, la entropía en un sistema siempre aumenta.

b) Verdadero. Si se produce una compresión isoterma, la variación de entropía está asociada a la variación de calor. Dado que el sistema pierde calor durante la compresión, en el proceso se produce una disminución de la entropía.

c) Falsa. La energía interna y la entropía dependen de otras variables como los calores específicos a presión o el volumen constante, calor cedido o absorbido en el proceso.

2)

a) Primero describiremos los procesos que tienen lugar. Inicialmente, tenemos una masa de 1 kg de oxígeno con una temperatura T_1 de 300 K y una presión P_1 de 2 bares. Se aumenta la temperatura en T_2 (1.500 K) y la presión P_2 es de 1,5 bares. Recordemos la definición del segundo principio de la termodinámica (ecuación 38):

$$\Delta S = \Delta Q/T \tag{61}$$

Es decir, la variación de entropía es igual a la variación de calor entre la temperatura del sistema.

En los procesos a los que se somete el oxígeno cuando pasa de un estado a otro, ¿que sucede con la entropía?, ¿aumenta o disminuye? Veámoslo para cada paso.

Proceso de 1 a 2 (de 300 K y 2 bares a 1.500 K y 1,5 bar)

Si recordáis, el calor es una magnitud física que se mide y que depende del calor específico y de la variación o incremento de temperatura. Dado que en el proceso de 1 a 2 se produce un incremento de temperatura, la variación de calor en el proceso será positiva, ya que el incremento de temperatura se calcula como la diferencia entre la temperatura final y la inicial, es decir, la diferencia $T_2 - T_1$ da un valor positivo. Si el calor es positivo, según el convenio utilizado, es un calor que se absorbe en el proceso de 1 a 2 y, por lo tanto, al aplicar la definición del segundo principio de la termodinámica (ec. 61), la entropía aumentará.

Por lo tanto, en el proceso de 1 a 2 se produce un aumento de la entropía debido a la absorción de calor.

Proceso de 2 a 3 (compresión isoterma)

En el proceso de 2 a 3, el oxígeno tiene una temperatura T_2 de 1.500 K y la presión P_2 es de 1,5 bares. Para pasar al estado 3 se realiza una compresión isoterma, es decir, el proceso de 2 a 3 será un proceso a temperatura constante (T = *constante* = 1.500 K). Dado que el sistema pierde calor durante la compresión, en el proceso se produce una disminución de la entropía.

Por lo tanto, en un proceso de compresión isoterma, la entropía disminuye.

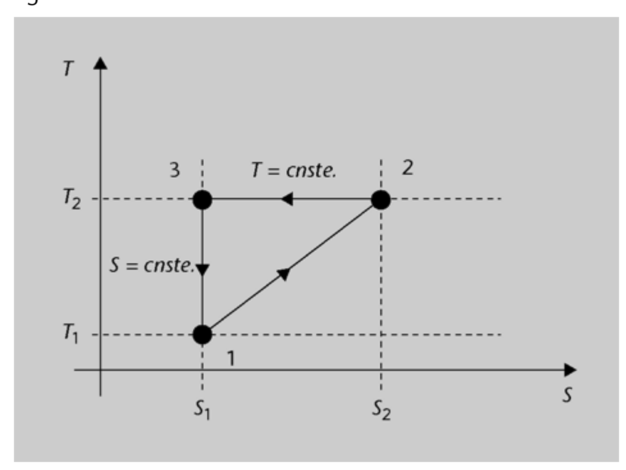
Proceso de 3 a 1 (proceso isentrópico)

En el proceso de 3 a 1, el oxígeno pasa por un proceso isoentrópico, es decir, un proceso a entropía constante (S = constante). El oxígeno tiene una temperatura T_3 de 1.500 K y la entropía es S_3, que coincide con la entropía inicial, es decir, S_1. El paso al estado 1 se realiza a S = constante (no hay variación de entropía en un proceso isoentrópico).

b) Dibujad el diagrama *T-S*

Partiendo de los procesos y valores anteriores, se observa que el oxígeno pasa por diferentes estados termodinámicos identificados como 1, 2 y 3. En cada uno de éstos, el oxígeno tendrá unos valores de presión (P) y temperatura (T) y, por lo tanto, de entropía (S).

Figura 65



3)

Es necesario determinar cuál es la potencia que obtenemos del generador para cada velocidad. Si partimos de los datos del gráfico, obtenemos los valores siguientes:

Taula 66. Tabla de velocidades del viento y potencia

Velocidad del viento (m/s)	0	5	10	15	20	25	30	35
***P* (kW)**	0	100	1.200	2.000	2.000	2.000	0	0

Una vez que tenemos la potencia para cada velocidad del viento, calculamos la energía que obtenemos a lo largo del año de la manera siguiente:

$$E\text{ (kWh)} = P\text{ (kW)} \cdot t\text{ (h)} \quad (62)$$

Por lo tanto, multiplicamos el valor de las horas equivalentes de cada velocidad del viento que nos da el gráfico por la potencia y obtenemos los resultados siguientes:

Figura 66. Tabla de energía del viento

Horas al año (h)	1.256	1.873	1.689	1.973	906	715	192	156
Velocidad viento (m/s)	0	5	10	15	20	25	30	35
***P* (kW)**	0	100	1.200	2.000	2.000	2.000	0	0
***E* (kWh)**	0	187.300	2.026.800	3.946.000	1.812.000	1.430.000	0	0

Es decir, obtendremos una energía anual aproximada de 9.402 MWh.

Para calcular el coeficiente de potencia del aerogenerador deberemos aplicar la ecuación 42:

$$P = 1/2 \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot c_p \quad (63)$$

De la que, si despejamos el término del coeficiente de potencia tenemos:

$$c_p = P / (1/2 \cdot \rho \cdot A \cdot v^3) \quad (64)$$

La rho (ρ) es la densidad del aire y vale 1,2 kg/m^3.

A es el área de barrido de las palas. El enunciado nos dice que el diámetro del aerogenerador es 80 m, por lo tanto:

$$A = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot (80/2)^2 = 5.026{,}5 \text{ m}^2 \quad (65)$$

Del gráfico del aerogenerador extraemos la potencia que tenemos para cada velocidad del viento, para este aerogenerador, y obtenemos los valores siguientes:

Figura 67. Tabla de velocidades del viento y potencia del aerogenerador

v (m/s)	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
***P* (kW)**	50	100	200	400	700	900	1.200	1.500	1.700	1.900	1.950

v (m/s)	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
***P* (kW)**	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000

A partir de cada velocidad y potencia obtenidas, vamos calculando el coeficiente de potencia del aerogenerador (atención: las unidades de potencia deben estar en watts y no en kilovatios). Obtenemos así los resultados siguientes:

Figura 68. Coeficiente de potencia

v (m/s)	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
***P* (kW)**	50	100	200	400	700	900	1.200	1.500	1.700	1.900	1.950	2.000
c_p	0,26	0,27	0,31	0,39	0,45	0,41	0,40	0,37	0,33	0,29	0,24	0,20

v (m/s)	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
***P* (kW)**	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
c_p	0,16	0,13	0,11	0,10	0,08	0,07	0,06	0,05	0,05	0,04

Así, tenemos un coeficiente de potencia máximo de 0,45 para una velocidad de 8 m/s. Se trata, por lo tanto, de una máquina media, ni muy buena (por encima de 0,5) ni muy mala (por debajo de 0,4).

4)

Lo primero que debemos hacer es determinar la demanda eléctrica que tendremos. Utilizamos, pues, la tabla de cálculo del consumo que hemos detallado y la cumplimentamos con los datos del enunciado del problema:

Figura 69. Tabla de consumo diario previsto

Consumos variables				
Aparato	**Número de aparatos**	**Potencia (W)**	**Tiempo (h/día)**	**energía (Wh/día)**
Punto de luz	12	20	3,0	720
Televisión	1	125	3,0	375
Vídeo	1	45	2,0	90
Minicadena	1	180	5,0	900
Batidora	1	250	0,5	125
Ordenador	1	150	2,0	300
Microondas	1	650	0,5	325
Total consumos variables				**2.835**
Consumos continuos				
Aparato	**Número de aparatos o servicios día**	**Energía (Wh/día o servicio)**		**Energía (Wh/día)**
Lavadora	0,5	400		200
Nevera	1	1.200		1.200
Total consumos continuos				**1.400**
Total consumo diario previsto (Wh)				**4.325**

Supongamos que tendremos una instalación en corriente alterna y, por lo tanto, debemos aplicar un factor de 0,75 de rendimiento total de la instalación. Así, la energía diaria necesaria será de:

$$4.235/0,75 = 5.647 \text{ Wh/día} \qquad (66)$$

Tomamos ahora los valores de radiación y buscamos el más desfavorable de entre los que se utilizarán en la instalación (de junio a septiembre). Vemos que el mes más desfavorable es septiembre y, por lo tanto, elegiremos la inclinación de los módulos que maximiza los resultados, que es la de 40° (la adjuntamos).

Figura 70. Radiación solar del emplazamiento (del enunciado del problema)

Orientación: 0°													
Inclinación	**Ene**	**Feb**	**Mar**	**Abr**	**Mayo**	**Jun**	**Jul**	**Ago**	**Sept**	**Oct**	**Nov**	**Dic**	**Anual**
40°	9,24	12,78	16,45	19,24	25,50	20,88	20,67	19,71	17,43	13,72	9,89	7,81	15,70

Así, tendremos una radiación solar incidente mínima de 17,43 MJ/m^2/día.

Si convertimos este valor a kWh/m^2 y día:

$$17{,}43 \text{ MJ/m}^2 \text{ y día} \cdot 1 \text{ kWh}/3{,}6 \text{ MJ} = 4{,}84 \text{ kWh/m}^2\text{/día} \qquad (67)$$

Dado que las tablas de los módulos fotovoltaicos muestran los valores estándares de prueba, para obtener las horas de sol pico (HSP) debemos dividir por una radiación de 1 kWh/m^2. Así:

$$4{,}84\ \text{kWh/m}^2 \text{ y día} \cdot 1\ \text{HSP}/1\ \text{kWh/m}^2 = 4{,}84\ \text{HSP al día} \qquad (68)$$

Como tendremos una instalación de uso diario, calcularemos el número de módulos necesarios a partir de la ecuación 51:

$$\textit{Número de módulos} = \textit{Energía necesaria}\ (\text{Wh/día}) \,/\, (\textit{Potencia pico del módulo}\ (W_p) \cdot \eta_{campo} \cdot \textit{Radiación solar}\ (\textit{HSP/día})) \qquad (69)$$

El rendimiento de campo se situará entre 0,70 y 0,80. Si hacemos un cálculo, para cada módulo de potencia diferente y para cada rendimiento del sistema, obtenemos lo siguiente:

Figura 71. Número de módulos

P_{max} (W_p)	165	170	175	180
rend = **0,7**	10,10	9,80	9,52	9,26
rend = **0,8**	8,84	8,58	8,33	8,10

Vistos los resultados, lo mejor será optar por **diez módulos del módulo IS-170**, teniendo en cuenta que:

- no llegamos a cubrir la demanda con ocho módulos de ningún otro modelo y
- con diez módulos del IS-165 no cubriríamos la demanda, ya que el resultado obtenido es superior a 10. No obstante, lo podríamos considerar como una solución, si por ejemplo económicamente supusiera un ahorro importante, pero deberemos tener en cuenta que la instalación puede estar ligeramente infradimensionada y, por lo tanto, se pueden dar situaciones en las que no se cubra la demanda.

Pasemos ahora a calcular el numero de baterías. Para hacerlo, utilizaremos la ecuación 54:

$$\textit{Capacidad de batería}\ (\text{Ah}) = (\textit{Energía necesaria}\ (\text{Wh}) \cdot \textit{Días autonomía}) \,/\, (\textit{Voltaje de las baterías}\ (\text{V}) \cdot \textit{Profundidad de descarga de la batería}) \qquad (70)$$

La energía necesaria es de 5.647 Wh/día. Supondremos tres días de autonomía, ya que en el clima mediterráneo, y durante el período de verano, difícilmente hay más de tres días seguidos sin radiación. Usaremos baterías de 12 V y de tipo monobloque, y supondremos que la profundidad de descarga es de 0,45. Por lo tanto, con estos valores tenemos:

$$\textit{Capacidad de la batería}\ (\text{Ah}) = (5.647 \cdot 3) \,/\, (12 \cdot 0{,}45) = 3.137\ \text{Ah} \qquad (71)$$

Si hacemos el cálculo para cada modelo de batería de 12 V que hay en la tabla, obtenemos los resultados siguientes:

Figura 72. Número de baterías

c100	45	68	90	136	158	204
núm. baterías	69,72	46,14	34,86	23,07	19,86	15,38

Será una buena opción elegir **20 baterías del modelo 12.AV.158 o 16 baterías del modelo 12.AV.204**.

Resumen

Hemos comenzado el módulo con conceptos que forman parte de nuestra vida cotidiana, como el calor, la energía y la temperatura. Los hemos definido formalmente y hemos mostrado qué procesos se producen entre ellos. Básicamente, que el calor se transmite por conducción, convección y radiación y que la temperatura es una medida del calor.

A continuación hemos definido los conceptos de energía interna del sistema, y de entropía. El primero nos da idea de toda la energía contenida en el sistema (cinética, potencial, etc.) y el segundo, del desorden. También hemos visto que la presión, la temperatura y el volumen definen un sistema termodinámico. Por otro lado, un sistema termodinámico estará en equilibrio cuando esté en equilibrio térmico, mecánico y químico.

Para acabar esta primera parte, hemos visto las tres leyes de la termodinámica:

1) La ley cero, que nos dice que al poner en contacto dos cuerpos con temperaturas diferentes, acabarán alcanzando la misma temperatura.

2) La primera ley de la termodinámica, que nos dice que la energía se conserva, no se crea ni se destruye.

3) La segunda ley de la termodinámica, que nos dice que la entropía siempre crece. Esta ley refleja, por lo tanto, que los procesos tienen lugar en una única dirección.

En los países industrializados, la demanda energética tiene una tendencia creciente, hasta el punto de que actualmente ya no podemos concebir nuestra sociedad sin energía y, sobre todo, sin energía eléctrica. Para valorar cómo es este consumo de energía, nos debemos referir a términos como *energía primaria*, que incluye las pérdidas que tenemos en el sistema y que, además, nos permite tener una visión global de las fuentes energéticas utilizadas. Actualmente, en el caso de España, si analizamos la energía primaria consumida, vemos que proviene, en más de un 80%, de combustibles fósiles (petróleo, gas natural y carbón), que son recursos que se obtienen fuera de nuestro territorio.

Además, dentro del sector energético, la energía eléctrica es la que tiene un mayor potencial de crecimiento (con la implantación de los vehículos eléctricos, por ejemplo), pero es necesario tener presente que ésta no es una energía primaria y que, por lo tanto, tiene asociados unos rendimientos de generación próximos al 40%.

Por otro lado, el impacto del sistema energético actual es múltiple. En éste destacan impactos ambientales de alcance global, como el efecto invernadero provocado por el consumo de combustibles fósiles, la generación de residuos

nucleares, los conflictos geoestratégicos a escala mundial, etc. En este contexto, las energías renovables emergen como una alternativa real que hay que tener presente.

El mercado eléctrico es un elemento complejo en el que los diferentes actores (productores, transportistas y distribuidores, comercializadores y consumidores) actúan coordinadamente, mediante el operador del mercado, para que en cada instante la energía eléctrica producida sea equivalente a la energía consumida.

Las centrales térmicas son actualmente la tecnología más importante del mercado eléctrico español. Éstas llevan a cabo ciclos termodinámicos de tipo Rankine (asociado al vapor) o de tipo Brayton (asociado al gas). De los diferentes tipos de centrales térmicas, las de más rendimiento son las de ciclo combinado, que realizan a la vez el ciclo de vapor y el del gas y que alcanzan rendimientos de generación próximos al 55%, en lugar del rendimiento del 30-35% de las centrales térmicas convencionales.

Las centrales nucleares también llevan a cabo el ciclo de Rankine para generar electricidad, es decir, en esencia también son centrales térmicas. La única diferencia entre éstas y las centrales que queman combustibles fósiles es la fuente de calor que utilizan. Al no quemar combustibles fósiles, no emiten gases de efecto invernadero, pero generan residuos radioactivos de diferente intensidad, cuya gestión no está del todo resuelta actualmente.

En este contexto, las energías renovables se presentan como una alternativa de generación de energía eléctrica con una ventaja doble: no emiten gases de efecto invernadero y no implican la dependencia del exterior, ya que consumen un recurso local e inagotable.

El aspecto poco ventajoso de las tecnologías renovables es que no tienen la facilidad de regulación de las centrales térmicas (que pueden regular la potencia con la introducción de más o menos combustible). El viento y la radiación solar no se regulan y, por lo tanto, si el sistema eléctrico del futuro cubre la demanda exclusivamente con energías renovables, habrá que resolver este hecho.

Un aspecto muy importante que hay que considerar, antes de la construcción de las plantas de energías renovables, es estudiar los recursos disponibles en cada emplazamiento concreto. La radiación solar es un recurso fácilmente cuantificable y hay muchas tablas que la cuantifican. El viento es un recurso mucho más local, que varía en función de la altura, la topografía, la rugosidad del terreno, etc., y que deberemos cuantificar muy bien, ya que la potencia que podemos extraer de él depende de su velocidad al cubo.

La energía del viento se obtiene a partir de los aerogeneradores. El primer limitante de la tecnología está determinado por el teorema de Betz, que esta-

blece que sólo podemos extraer menos de 16/27 partes de la energía contenida en el viento. Los aerogeneradores se caracterizan por su curva de potencia o coeficiente de potencia para cada velocidad del viento; con estos términos podemos valorar la energía que podremos extraer de éste para una frecuencia de viento determinada. La implantación de parques eólicos, sin embargo, supone un impacto ambiental negativo, sobre todo paisajísticamente, por lo que habrá que tener cuidado a la hora de definir los emplazamientos aptos para su construcción.

La energía solar tiene diferentes aplicaciones, desde las meramente térmicas (como la producción de agua caliente para la ducha o la calefacción) a la producción de energía eléctrica. Esta última conversión se puede llevar a cabo mediante ciclos de Rankine, en los que el fluido se calienta con radiación solar o directamente con células fotovoltaicas. Las células fotovoltaicas están formadas por silicio dopado, es decir, silicio al que le introducen impurezas para mejorar su comportamiento eléctrico. Se trata, en esencia, de un generador de intensidad y su comportamiento está descrito por la curva de intensidad-voltaje.

En las aplicaciones de la energía fotovoltaica para la electrificación autónoma hay que dimensionar con cuidado los diferentes elementos que forman el sistema: el número de módulos fotovoltaicos y el sistema de baterías, pero también el regulador, el inversor, el cableado y las protecciones de la instalación.

Entre las diferentes opciones disponibles para los sistemas de generación eléctrica autónoma, debemos analizarlas todas y determinar cuál es la que más conviene en cada emplazamiento en el que haya una demanda y donde la red eléctrica no llegue o el coste de hacerla llegar sea muy alto. Si necesitamos una solución temporal, elegiremos principalmente un sistema de generador autónomo con motor de gasóleo o gasolina. Como solución a largo plazo, elegiremos las plantas fotovoltaicas o los sistemas híbridos de energía fotovoltaica y eólica.

Ejercicios de autoevaluación

1. Decid cuál de estas afirmaciones es verdadera:
a) La temperatura es energía.
b) La temperatura de un cuerpo depende de la velocidad de las partículas, de su número, de su medida y de su tipo.
c) El calor es una medida de la energía.
d) Todas las anteriores son falsas.

2. Decid cuál de estas afirmaciones es falsa:
a) La conductividad térmica es una propiedad característica de los materiales.
b) La conductividad térmica no depende de la temperatura.
c) La conductividad térmica nos da una idea de la facilidad que presentan los materiales al paso del calor a través de ellos.
d) Se dice que un material es un buen conductor si tiene un valor alto de conductividad térmica.

3. La transmisión de calor se produce por tres mecanismos: conducción, convección y radiación. Decid cuál de las siguientes afirmaciones es la correcta:
a) La conducción se produce, exclusivamente, en medios sólidos.
b) La convección es característica de situaciones en las que está presente un gas.
c) Cuando un sólido y un líquido con diferente temperatura están en contacto e intercambian calor, el mecanismo de intercambio es la convección.
d) La radiación es una forma de intercambio de calor a partir de partículas subatómicas.

4. En un calorímetro se inyecta vapor de agua a 100 °C en 250 g de agua a 20 °C. Cuando el agua del vaso está a 60 °C, la cantidad de vapor de agua inyectada es:
a) 17,2 g.
b) 4,5 g.
c) 15,0 g.
d) 68,8 g.
(Datos: C_e del agua = 4.180 J/kg K, $c_e = 2{,}26 \cdot 10^6$ J/kg)

5. El primer principio de la termodinámica se enuncia:
a) "La cantidad de energía que se transfiere a un sistema en forma de calor (Q) más la cantidad de energía transferida al sistema en forma de trabajo (W) debe ser igual al aumento de energía interna (U) del sistema".
b) "La cantidad de energía que se transfiere a un sistema en forma de calor (Q) menos la cantidad de energía transferida al sistema en forma de trabajo (W) debe ser igual al aumento de energía interna (U) del sistema".
c) "El aumento de energía interna (U) del sistema siempre es constante".
d) "Nunca se realiza trabajo ni se pierde calor en un sistema termodinámico".

6. La energía primaria es un término que ayuda a tener una visión global del consumo energético, ya que...
a) ... no incluye las pérdidas por transformación energética.
b) ... representa el total de consumo energético, igual que la energía final.
c) ... incluye las pérdidas de transformación y transporte de la energía.
d) ... se valora la energía consumida por un país en relación con su PIB.

7. La energía eléctrica...
a) ... es un tipo de energía primaria.
b) ... es un tipo de energía secundaria y de energía final.
c) ... es un tipo de energía secundaria, que es necesario transformar antes del consumo.
d) ... es la energía más limpia que existe porque no genera emisiones al consumirla.

8. Respecto a los impactos ambientales, sociales y económicos asociados a la energía eléctrica, podemos afirmar que...
a) ... los combustibles fósiles no suponen conflictos sociales por tratarse de recursos propios.
b) ... cualquier tipo de combustión, y también la de biomasa o leña, provoca un efecto invernadero por la emisión de dióxido de carbono.
c) ... la energía nuclear es la única opción para combatir el cambio climático.
d) ... lo mejor es optar por la racionalización y el ahorro energético en un primer término y desarrollar plantas de energías renovables.

9. Los agentes que intervienen en el mercado eléctrico son...
a) ... los productores, REE y las distribuidoras locales, las comercializadoras y los grandes consumidores, coordinados por la OMEL.
b) ... las centrales térmicas, las distribuidoras, los comerciantes y los consumidores, coordinados por la OMEL.
c) ... los productores, las distribuidoras locales, las comercializadoras y los consumidores, coordinados por REE.
d) ... los productores, REE y las distribuidoras locales y las comercializadoras, coordinados por la OMEL.

10. Las centrales térmicas más eficientes son...
a) ... las centrales que utilizan gas natural y el ciclo de Rankine.
b) ... las centrales nucleares.
c) ... las centrales de ciclo combinado, que realizan el ciclo de Rankine asociado al vapor y el ciclo de Brayton asociado al gas.
d) ... las centrales de ciclo combinado, que realizan el ciclo de Rankine asociado al gas y el ciclo de Brayton asociado al vapor.

11. Los recursos renovables de radiación solar y viento...
a) ... se deben cuantificar adecuadamente para cada emplazamiento.
b) ... se pueden almacenar y transportar hasta el punto de consumo.
c) ... se pueden regular fácilmente.
d) ... están siempre disponibles, y hacemos el consumo necesario en cada momento.

12. Podemos afirmar respecto a la energía eólica...
a) ... que tiene impactos positivos, como que utiliza un recurso local y que provoca un efecto de parpadeo.
b) ... que la velocidad del viento es el aspecto que más afecta a la hora de determinar la potencia que podemos extraer de ella.
c) ... que el teorema de Betz supone que podemos extraer toda la energía contenida en el viento.
d) ... que habrá que conocer la curva de potencia y el coeficiente de potencia de un aerogenerador para determinar la potencia que puede generar.

13. La energía solar...
a) ... únicamente se puede transformar en electricidad con células fotovoltaicas.
b) ... se puede transformar en energía eléctrica con células fotovoltaicas y mediante un ciclo de Brayton asociado a un fluido calentado con radiación solar.
c) ... se puede transformar en electricidad mediante el efecto fotovoltaico con (de mayor a menor rendimiento) silicio amorfo, silicio monocristalino y silicio policristalino.
d) ... necesita siempre baterías para poderse utilizar, también en las plantas fotovoltaicas conectadas a la red eléctrica.

14. Si necesitamos un sistema de generación eléctrica aislada...
a) ... elegiremos la implantación de un generador con motor de gasóleo en el caso de que necesitemos una solución a largo término.
b) ... evaluaremos el coste de hacer llegar allí la línea eléctrica, que es la opción más fiable.
c) ... implantaremos un sistema híbrido eólico y fotovoltaico, como solución temporal.
d) ... analizaremos el coste económico de hacer llegar allí la red eléctrica y lo contrastaremos con el coste de una instalación fotovoltaica, como solución a largo término.

Solucionario

1. b; **2.** b; **3.** c; **4.** a; **5.** a; **6.** c; **7.** b; **8.** d; **9.** a; **10.** c; **11.** a; **12.** b; **13.** b i **14.** d.

Glosario

acumulador *m* Sistema que permite independizar, en el caso de una instalación solar fotovoltaica, la generación de energía del momento de consumo. El sistema está formado normalmente por baterías de tipo plomo-ácido. Las baterías están formadas por partes denominadas células que tienen un voltaje de 2 V.

aerogenerador *m* Aparato que transforma la energía cinética del viento en energía eléctrica. Concretamente, la energía cinética del viento hace girar las aspas y la energía cinética de estas aspas es la que genera electricidad en un alternador. Como en el caso de los generadores eléctricos o de las turbinas, el movimiento del eje se transforma en energía eléctrica.

calor *m* Contenido energético de un sistema. No es una nueva forma de energía, sino una transferencia de energía en la que interviene un gran número de partículas.

calor específico *m* Relación entre el calor que gana una unidad de masa (1 kg en el Sistema Internacional de Unidades) de una determinada sustancia y el aumento de temperatura que experimenta.

calor latente *m* Relación entre la transferencia de calor y la cantidad de masa en el proceso de cambio de estado.

caloría *m* Cantidad de calor necesaria para aumentar un grado la temperatura de un gramo de agua líquida. La equivalencia entre julios y calorías es 1 cal = 4,184 J.

cambio climático *m* Alteraciones en el clima a causa de la modificación de la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera actual.

capacidad de acumulación *f* Término básico de las baterías que se calcula multiplicando la intensidad de descarga I (en amperios) que puede proporcionar la batería por el tiempo de descarga t (en horas). Se expresa en Ah (amperios hora).

captador fotovoltaico *m* Elemento capaz de transformar la radiación solar en energía eléctrica. Está formado por un conjunto de células fotovoltaicas de silicio dopado (un material semiconductor) interconectadas entre sí.

sin. **panel fotovoltaico**, **placa fotovoltaica**

célula fotovoltaica *f* Elemento básico de un captador fotovoltaico que consta de dos capas de silicio, una dopada positivamente (silicio de tipo p) y otra negativamente (silicio de tipo n), y unos contactos positivos en la parte anterior de la célula (que suelen ser de plata) y un contacto posterior negativo.

central de bombeo *f* Instalación que puede funcionar de manera reversible: puede generar electricidad a partir de la energía acumulada en un salto de agua y puede consumir electricidad y bombear agua de un nivel inferior a otro superior. Son instalaciones que se utilizan sobre todo para regular el mercado eléctrico y ajustar las diferencias entre la oferta y la demanda.

sin. **central reversible**

central de ciclo combinado *f* Central térmica que dispone de dos ciclos termodinámicos: un ciclo de Rankine para el vapor en circuito cerrado que toma la energía de un proceso de combustión y un ciclo de Brayton para los humos de la quema del combustible. El rendimiento de generación de estas instalaciones se sitúa alrededor del 55%.

central nuclear *f* Central térmica que obtiene el calor necesario para activar el ciclo de Rankine del vapor de la fisión nuclear de los elementos combustibles, elaborados de uranio.

central reversible *f* Véase **central de bombeo.**

central térmica *f* Central que, a partir de un ciclo termodinámico, genera electricidad. Este tipo de centrales lleva a cabo un único ciclo termodinámico, que puede ser de tipo Brayton o de tipo Rankine. El rendimiento medio de estas instalaciones se sitúa alrededor del 30%.

ciclo de Brayton *m* Ciclo termodinámico abierto de generación de energía eléctrica a partir de una turbina de gas.

ciclo de Rankine *m* Ciclo termodinámico cerrado de generación de energía eléctrica a partir de una turbina de vapor.

coeficiente de potencia *m* Relación entre la potencia eléctrica disponible y la potencia eólica de entrada. Este término nos permite obtener directamente, a partir de la velocidad del viento, la potencia eólica que nos da el aerogenerador.

conducción *f* Mecanismo de transferencia de energía térmica entre dos sistemas basado en el contacto de sus partículas sin flujo de materia y que tiende a igualar la temperatura entre dos puntos.

convección *f* Sistema de transmisión de energía característico de los fluidos (gases y líquidos).

combustión *f* Reacción química que se lleva a cabo a partir de un combustible (petróleo, carbón, madera, etc.) mezclado con oxígeno. Como resultado de la combustión se obtiene dióxido de carbono y agua, entre otros elementos (monóxido de carbono, cenizas, etc.).

combustible fósil *m* Combustible aparecido a partir de la concentración de materia orgánica prehistórica, sometida a presión y acumulada en lugares concretos de la Tierra. Existen tres tipos: el carbón (sólido), el petróleo (líquido viscoso) y una mezcla de metano, propano, butano, etc. (gases). La combustión intensiva de combustibles fósiles está alterando la composición de la atmósfera por la emisión del dióxido de carbono captado ahora hace millones de años por los organismos, y esto es lo que se conoce como cambio climático.

comercializadora *f* Agente del mercado eléctrico que emite contratos con los consumidores de energía y se encarga de considerarlos en el mercado de la energía eléctrica.

contaminante primario *m* Monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno (que provocan lluvia ácida) o partículas en suspensión (cenizas y polvo con una medida de partícula muy pequeña y que pueden penetrar en el organismo a través de las vías respiratorias). Afecta principalmente a las zonas próximas al punto de emisión, es decir, cerca de la chimenea.

contaminante secundario *m* Gas de efecto invernadero, principalmente dióxido de carbono. Este tipo de contaminante se diferencia del contaminante primario porque tiene un efecto global, no sólo en el punto de emisión, sino en todo el planeta.

curva *I-V* *f* Curva característica de un captador fotovoltaico.

curva de potencia de un aerogenerador *f* Curva que indica la potencia eléctrica del aerogenerador para las diferentes velocidades del viento.

corriente de cortocircuito *m* Parámetro característico de un captador fotovoltaico que corresponden al valor de corte de la curva *I-V* con el eje de ordenadas, es decir, el punto de corte con el eje de la intensidad, cuando el voltaje es cero. Se simboliza como I_{cc} o I_{sc} (del inglés *short circuit*).

diagrama de Sankey *m* Representación gráfica del consumo de energía en un ecosistema natural o artificial, a partir de franjas que representan, según su amplitud, la cantidad de energía correspondiente, y según su dirección, el destino final de esta energía.

disposición geológica profunda *f* Tipo de sistema de gestión de los residuos nucleares.

dopaje *m* Proceso por el que se introducen impurezas en un material semiconductor.

energía *f* Capacidad que tiene un cuerpo de realizar trabajo o de transformar o calentar.

energía eléctrica *f* Forma de energía que surge de la existencia de una diferencia de potencial entre dos puntos. Esto permite establecer una corriente eléctrica entre ambos (cuando se los pone en contacto mediante un conductor eléctrico) para obtener trabajo de ésta. Se trata de un tipo de energía secundaria y también de un tipo de energía final.

energía final *f* Energía que consumimos realmente, es decir, la que pagamos con nuestras facturas de gas y electricidad.

energía interna *f* Energía contabilizada por la suma de la energía cinética de las moléculas y los átomos que constituyen el sistema, la energía de rotación y vibración, además de la energía potencial entre las moléculas

energía libre *f* Energía presente en la naturaleza, en forma de temperatura, energía potencial, movimiento, etc.

energía primaria *f* Energía libre que puede ser captada y aprovechada por el hombre. Los principales tipos de energía primaria son los combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural), la energía nuclear y las energías renovables (solar, eólica, biomasa, etc.). Es un término muy utilizado en la estadística energética, ya que incluye las pérdidas por transformaciones energéticas del sistema.

energía secundaria *f* Forma de energía obtenida a partir de la energía primaria.

energía solar *f* Energía primaria con origen en la radiación solar.

energía útil *f* Energía que realmente necesitamos, la que se utiliza para satisfacer la necesidad que origina el consumo, la que aprovechamos. La diferencia entre la energía final y la energía útil será el rendimiento del aparato que utilicemos.

entorno *m* Región del espacio que existe más allá de la frontera.

entropía *f* Tendencia natural al desorden.

factor de forma *m* Relación matemática, para la curva *I-V* de un captador solar fotovoltaico, que pone de manifiesto la proporcionalidad entre el valor de la superficie del rectángulo delimitado por el punto de máxima potencia (V_{pmp}, I_{pmp}) y el rectángulo que se formaría desde los valores máximos de la curva (V_{co}, I_{cc}).

fuente de energía renovable *f* Fuente de energía que, al consumirla, no condiciona su disposición futura, como la energía eólica, la energía solar, la energía mareomotriz, etc.

frontera *f* Límite del sistema definido por una superficie arbitraria.

gas de efecto invernadero *m* Gas que provoca el efecto conocido como cambio climático, ya que altera la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera actual, principalmente dióxido de carbono y metano.

instalación de energía solar fotovoltaica *f* Instalación que capta la radiación solar en una célula fotovoltaica, que la transforma directamente en energía eléctrica, de corriente continua.

instalación de energía solar térmica *f* Instalación que capta la energía solar con la finalidad de cubrir las necesidades térmicas.

instalación de energía solar termoeléctrica *f* Instalación que capta la radiación solar en forma de calor y que la transforma en energía eléctrica.

intensidad de la energía primaria *f* Valoración del incremento de consumo de la energía primaria de un país, asociado a su producto interior bruto (PIB) anual.

inversor *m* Elemento de una instalación fotovoltaica que, a partir de la electrónica de potencia, permite la transformación de la corriente continua de los módulos fotovoltaicos o de las baterías en corriente alterna apta para el consumo de la instalación eléctrica.

sin. **ondulador**

kelvin *m* Unidad de medida de la temperatura absoluta en el Sistema Internacional de unidades.

kTEP *f* Kilotonelada equivalente de petróleo, que es una unidad de energía. Una kTEP equivale a 1.000 TEP (toneladas equivalentes de petróleo) y tenemos las equivalencias siguientes: 1 TEP = 41.868.000.000 J (julios) = 11.630 kWh (kilovatios hora). En inglés, TEP corresponde a TOE (*tonne of oil equivalent*).

ley de Betz *f* Ley formulada por el físico alemán Albert Betz en 1926 que dice que únicamente podremos convertir menos de 16/27 (aproximadamente el 59%) de la energía cinética del viento en energía mecánica con la utilización de un aerogenerador.

ley de conservación de la energía *f* Véase **primer principio de la termodinámica**.

magnitud extensiva *f* Magnitud en la que el valor correspondiente a todo el cuerpo es igual a la suma del valor de cada una de sus partes. Son ejemplo de ello la masa, el volumen de un cuerpo o la energía de un sistema termodinámico.

magnitud intensiva *f* Magnitud en la que el valor correspondiente a todo el cuerpo no es igual a la suma del valor de cada una de sus partes. La temperatura es un ejemplo de ésta.

ondulador *m* Véase **inversor**.

pared adiabática *f* Pared que no permite el intercambio de calor o energía térmica.

pared rígida *f* Pared que no se puede desplazar y que no varía el volumen del sistema.

pared impermeable *f* Pared que no permite el paso de materia.

pared diatérmana *f* Pared que permite el paso de energía térmica.

pared móvil *f* Pared que se puede desplazar.

panel fotovoltaico *f* Véase **captador fotovoltaico**.

placa fotovoltaica *f* Véase **captador fotovoltaico**.

presión *f* Magnitud intensiva que se define como la fuerza por unidad de área o superficie.

primer principio de la termodinámica *m* Principio que afirma que, como la energía no se crea ni se destruye, la cantidad de energía que se transfiere a un sistema en forma de calor (Q) más la cantidad de energía transferida al sistema en forma de trabajo (W) debe ser igual al aumento de energía interna (U) del sistema.

sin. **ley de conservación de la energía**

proceso adiabático *m* Proceso termodinámico sin transferencia de calor.

proceso isóbaro *m* Proceso termodinámico a presión constante.

proceso isócoro *m* Proceso termodinámico a volumen constante.

proceso isotermo *m* Proceso termodinámico a temperatura constante.

productor eléctrico *m* Instalación que genera energía eléctrica a partir de diferentes tipos de energía primaria (hidráulica, térmica, nuclear, solar, eólica, etc.). Para caracterizarla se valora la potencia instalada y la cobertura anual de la demanda o *mix* de generación. Puede generarse en régimen especial (con ayudas e incentivos por parte del Gobierno) o en régimen ordinario (sin estas ayudas).

punto de máxima potencia *m* Punto que implica una potencia máxima entre los diferentes puntos que forman la curva *I-V* de un captador fotovoltaico. El punto de máxima potencia será aquel que en el gráfico maximice el área del rectángulo que obtenemos para cada punto. Los valores de la intensidad y del voltaje en este punto se denominan intensidad del punto de máxima potencia (I_{pmp}) y voltaje del punto de máxima potencia (V_{pmp}), respectivamente.

radiación *f* Tipo de mecanismo para la transferencia de calor. Es la emisión continua de energía radiante por un cuerpo.

Red Eléctrica de España, S. A. *f* Organismo que se encarga del mantenimiento y la gestión de las infraestructuras de transporte de energía eléctrica en alta tensión en el Estado español.

regulador *m* Aparato que gestiona una instalación fotovoltaica y que, con cierta información, da órdenes y hace actuar el sistema solar para evitar daños de los elementos.

segundo principio de la termodinámica *m* Ley que afirma que la entropía (S), es decir, el desorden de un sistema aislado, nunca puede decrecer.

semiconductor *m* Material para el que, mediante la adición de impurezas durante su fabricación, se pueden adaptar las propiedades eléctricas con el fin de que satisfagan mejor necesidades concretas. En el caso del silicio de tipo p o positivo se introduce boro, y en el caso del silicio de tipo n o negativo se introduce fósforo. Las impurezas se introducen cuando el silicio está fundido y quedan posteriormente en el interior de la estructura del material. Este proceso se denomina dopaje.

silicio amorfo *m* Silicio dopado que no tiene cristales en su estructura de solidificación, ya que a menudo se hace enfriar rápidamente sobre soportes de plástico o vidrio. Es el tipo de silicio fotovoltaico con menos rendimiento y más barato.

silicio monocristalino *m* Silicio dopado de tal manera que, al enfriarse el material, se forma un único tipo de cristal. Es el tipo de silicio de más calidad y, por lo tanto, del que se obtiene más rendimiento en la transformación de energía solar a electricidad. También es el más caro.

silicio policristalino *m* Silicio dopado de tal manera que, en el proceso de fabricación en el que se enfría el silicio, éste se solidifica y forma diferentes cristales. En este caso el rendimiento es más bajo que el del silicio monocristalino, pero el material también es menos caro.

sistema abierto *m* Sistema en el que puede haber flujo de materia y energía a través de su frontera, denominada superficie de control.

sistema aislado *m* Sistema en el que no hay intercambio ni de masa ni de energía con los alrededores.

sistema cerrado *m* Sistema en el que no hay flujo de materia a través de su frontera, aunque puede haber flujo de energía con el medio circundante.

sistema generador aislado *m pl* Sistema de generación eléctrica que es capaz de generar electricidad, pero que no lo hace conectado a la red, sino que es un sistema autónomo para el autoconsumo.

sistema termodinámico *m* Región del espacio que es objeto de estudio.

temperatura *f* Medida del calor o de la energía térmica de las partículas de una sustancia.

universo *m* Conjunto del sistema y el entorno.

voltaje de circuito abierto *m* Parámetro característico de la curva *I-V* de un captador fotovoltaico que se produce cuando el módulo no tiene ninguna carga conectada (y por lo tanto no circula intensidad por el circuito) y su superficie está iluminada. Es el punto en el que el voltaje observado se incrementa ligeramente y llega a un máximo. Se simboliza con V_{co} o V_{oc} (del inglés *open circuit*).

volumen *m* Magnitud extensiva definida como la propiedad que tienen los cuerpos de ocupar un determinado espacio.

Bibliografía

Coll, P.; Pretel, C.; Cortés, G. (2003). *Tecnologia Energètica* (temas 0 al 4). Barcelona: CPDA-ETSEIB.

Cusidó, J. A.; Puigdomènech, J.; Hervada, C.; Batet, Ll. (2002). *Mòduls ambientals del Departament de Física i Enginyeria Nuclear*. Barcelona: Edicions UPC.

Incropera, D. *Fundamentos de transferencia de calor*. Pearson Prentice Hall.

Kreith, B. (2001). *Principios de Transferencia de Calor*. Thomson Learning (Paraninfo).

Llorens, M. (1999). *Ingeniería Térmica*. Grupo editorial Ceac, S.A.

Ministerio de Industria, Turismo y Comercio (2008). *La Energía en España 2008*. Madrid.

Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino (2008). *Perfil ambiental de España 2008. Informe basado en indicadores NIPO 770-09-185-7*. Madrid.

Moran, S. (1995). *Fundamentos de termodinámica técnica*. Barcelona: Editorial Reverté, S. A.

Mott, R. L. (1994). *Mecánica de Fluidos Aplicada* (4.ª ed.). Prentice Hall, Hispanoamericana, S. A.

Munson, B.; Young, D.; Okiishi, T. (1999). *Fundamentos de Mecánica de Fluidos*. Ed. Limusa.

Operador del Mercado Ibérico de Energía - Polo Español, S. A. (2008). *Informe anual 2008*. Madrid.

Ortega, X.; Batet, Ll.; Coll P. (2003). *Tecnologia Energètica* (temas 5 al 8). Barcelona: CPDA-ETSEIB.

Potter, W. (1998) *Mecánica de Fluidos*. Pearson Prentice Hall.

Red Eléctrica de España, S. A. (2008). *El sistema eléctrico español 2008*. Madrid.

Wark, Kenneth (1995) *Termodinámica* (5.ª ed.). México: McGraw-Hill.